

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Návrh databanky pro predikci parametrů hydroabrazivního dělení materiálů

Proposal of Data Bank for Prediction of Hydroabrasive Dividing Materials Parameters

Student:

Bc. Dagmar KLICHOVÁ

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jan VALÍČEK, Ph.D.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě, 21. května 2009

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě, 21. května 2009

.....

Dagmar KLICHOVÁ

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D. za odborné vedení, řadu podnětných konzultací, cenné rady a zejména trpělivost, kterou se mnou měl. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Robertu Čepovi, Ph.D. a RNDr. Mileně Kušnerové, Ph.D. za důležité připomínky.

Věnováno dceři Zuzaně a mým rodičům.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KLICHOVÁ, D. Návrh databanky pro predikci parametrů hydroabrazivního dělení materiálů. Ostrava: katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 50 s. Diplomová práce, vedoucí: Valíček, J.

Diplomová práce se zabývá studiem geometrických parametrů topografie povrchu stěn vytvořených při hydroabrazivním dělení materiálů za účelem návrhu systematické databanky hlavních vstupních a výstupních údajů. Na základě získaných analytických informací z povrchu je odvozena topografická funkce pro následnou predikci vytypovaných technologických parametrů AWJ. V rámci interpretace naměřených hodnot jsou systematicky analyzovány vztahy mezi těmito parametry. Navržený systém vstupních a výstupních veličin databanky by měl zajistit vyhodnocení kvality právě vzniklého povrchu a sloužit tak k optimalizaci technologie hydroabrazivního dělení za účelem zvýšení efektivnosti této technologie a přispět k její automatizaci. Vytvořený návrh aplikace databanky je dokumentován v příloze diplomové práce.

ANNOTATION OF THESIS

KLICHOVÁ, D. Proposal of Data Bank for Prediction of Hydroabrasive Dividing Materials Parameters. Ostrava: Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2007, 52 p. Diploma's Work, tutor: Valíček, J.

This thesis deals with the study of the geometrical parameters of the walls surface topography created by the hydroabrasive dividing materials for the purpose of the proposal the main systematic database of input and output data. On the basis of the obtained analytical information from the surface a topographical function is derived for the subsequent prediction of chosen AWJ technological parameters. In the context of the interpretation of the measured values are systematically analyzed the relationships between these parameters. The proposed system of input and output variables of database should provide an evaluation of the generated surface quality and thus serve to the hydroabrasive dividing technology optimalization in order to increase the effectiveness of this technology and contribute to its automation. The proposed application of database is documented in an attachment of this thesis.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ	1
1 ÚVOD	4
2 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	5
3 POPIS SOUČASNÉHO STAVU	6
3.1 DĚLENÍ MATERIÁLŮ KAPALINOVÝM PAPERSEM	6
3.1.1 Čistý kapalinový paprsek WJ	6
3.1.2 Abrazivní kapalinový paprsek AWJ	7
3.2 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE AWJ	7
3.2.1 Nástroj	8
4 TECHNOLOGICKÉ FAKTORY	12
4.1 CHARAKTERISTIKA PŘÍMÝCH A NEPŘÍMÝCH FAKTORŮ	12
4.2 VÝZNAMNOST VLIVU FAKTORŮ AWJ	14
5 METODY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU	16
5.1 ROZDĚLENÍ METOD PRO HODNOCENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU	16
5.1.1 Mechanické metody	16
5.1.2 Optické metody	18
5.1.3 Jiné metody	19
5.2 PARAMETRY PROFILU POVRCHU	20
5.2.1 Normované parametry	20
5.2.2 Nenormované parametry	21
6 VLASTNÍ MĚŘENÍ	22
6.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ	22
6.2 MĚŘENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU VZORKŮ	24
6.2.1 Stínová metoda	24
6.2.2 Optický profilometr MicroProf FRT	25
6.3 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA DAT	26
6.4 PŘEVODNÍ KOEFICIENTY	28
6.5 VZÁJEMNÉ VZTAHY MEZI GEOMETRICKÝMI PARAMETRY	34
6.6 NÁVRH DATABANKY	36
7 ZÁVĚR	41
SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	42
PUBLIKACE AUTORA SOUVISEJÍCÍ S DANOU PROBLEMATIKOU	45
SEZNAM PŘÍLOH	46

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Seznam použitých zkratk

- AWJ - abrazivní vodní paprsek (Abrasive Water Jet)
- FFT - rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)
- MFM - magnetický silový mikroskop (Magnetic Force microscopes)
- RTG - radioizotopový termoelektrický generátor (Radioisotope Thermoelectric Generator)
- SEM - skenovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscopes)
- WJ - čistý vodní paprsek (Water Jet)

Seznam použitých symbolů

A_{AWJ}	- spotřeba práce na řez	[J]
d_0	- průměr vodního paprsku	[mm]
d_a	- průměr usměrňovací trubice	[mm]
d_f	- průměr fokusační trubice	[mm]
d_p	- průměr abraziva	[mm]
h	- tloušťka materiálu	[mm]
h_a	- iniciační zóna	[mm]
h_b	- přechodná zóna	[mm]
h_c	- řezná zóna	[mm]
h_{cel}	- celková odřezaná délka materiálu	[m]
h_d	- deformační zóna	[mm]
h_{rel}	- relativní hloubka řezu	[-]
H_p	- tvrdost abraziva	[-]
L	- vzdálenost trysky od povrchu materiálu	[mm]
l_a	- délka usměrňovací trubice	[mm]
l_f	- délka fokusační trubice	[mm]
m_a	- hmotnostní průtok abraziva	[kg·min ⁻¹]
n_p	- počet přechodů	[-]
p	- tlak	[Pa]
P_{AWJ}	- výkon AWJ v řezu	[W]
Q	- zpracované váhové množství materiálu	[kg]
Ra	- střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
RMS	- efektivní hodnota signálu intenzity světla	[a. u.]
Rq	- střední kvadratická odchylka profilu	[μm]
Rz	- největší výška nerovnosti profilu	[μm]
s	- směr posuvu	[°]

v	- rychlost posuvu řezné hlavy	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
V	- objem zpracovaného materiálu	$[\text{m}^3]$
v_a	- je rychlost pohybu abrazivních částic	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
W	- spotřeba elektrické energie	$[\text{kW} \cdot \text{h}]$
W_{hcel}	- spotřeba elektrické energie na řez	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1}]$
x	- zdvih	$[\text{mm}]$
Y_{ret}	- zpoždění řezné stopy	$[\text{mm}]$
δ	- deviační úhel	$[\text{°}]$
φ	- úhel působení	$[\text{°}]$

1 ÚVOD

Během několika posledních desetiletí došlo k prudkému rozvoji tzv. nekonvenčních metod obrábění, které byly vyvíjeny s rostoucími požadavky na ekonomické a ekologické ukazatele obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Tyto nekonvenční metody, mezi něž patří i technologie AWJ se využívají tam, kde jsou klasické metody málo účinné nebo selhávají úplně. Obrábění abrazivním kapalinovým paprskem je poměrně mladá nekonvenční technologie, která je předmětem mnohých výzkumů jak ve světě, tak i u nás. Její hlavní předností je, že řezné médium je v převážné míře abrazivo s vodou, čímž nedochází k lokálnímu přehřívání materiálů v místě řezu. Tato metoda má široké spektrum uplatnění v téměř každé oblasti. Abrazivní kapalinový paprsek dokáže dělit v podstatě všechny průmyslové materiály jako je papír, plast, kov, slitiny, kompozitní materiál, tvrdokov, aj. V současnosti, kdy je kladen obrovský důraz na ochranu životního prostředí, je tento způsob obrábění velmi aktuální.

Předkládaná práce se zabývá studiem drsnosti povrchů kovových materiálů vytvořených při hydroabrazivním dělení za účelem predikce vytypovaných technologických parametrů AWJ, které jsou prezentovány v systematické databance hlavních vstupních a výstupních údajů. Navržený systém databanky by měl sloužit k vyhodnocení kvality právě vzniklého povrchu, zajistit tak optimalizaci technologie hydroabrazivního dělení a přispět k její automatizaci s cílem zvýšit efektivnost této technologie.

2 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je vytvoření návrhu systematické databáze vstupů a výstupů pro optimalizaci parametrů při hydroabrazivním dělení materiálů za účelem zvýšení efektivnosti technologie AWJ. K získání analytických informací je zapotřebí navrhnout účelné matematicko-statistické zpracování dat geometrických parametrů topografie povrchu ve vztahu k vytypovaným technologickým a výkonným parametrům hydroabrazivního dělení materiálů a vzhledem k platným normovaným parametrům technologické drsnosti povrchů.

K dosažení cíle této diplomové práce bylo potřeba provést:

- literární rešerši,
- hodnocení současného stavu problematiky AWJ,
- charakteristika technologie dělení materiálů kapalinovým paprskem,
- rozbor vlivu technologických parametrů na vytvoření povrchu vodním abrazivním paprskem,
- postup měření a hodnocení topografie povrchu vytvořeného AWJ,
- analýza experimentálně získaných dat,
- návrh matematicko-statistického zpracování dat,
- návrh databanky technologických parametrů vstupních a výstupních veličin ovlivňujících výslednou topografii povrchů za účelem zvýšení účinnosti technologie AWJ.

3 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

V dnešní době na zhotovení stroje nebo zařízení je nejpracnější výrobním procesem výroba součástek. Spotřebuje se na ni 40-80 % celkové pracovní síly. Základním procesem při zhotovování součástky je dělení. Je to pracovní proces, při kterém se odděluje z dané hmoty materiálu objem, odpovídající objemu hotové součástky a přídavku na další zpracování dané součástky. Dělení materiálu se významně podílí na spotřebě a následném využití materiálu, na jeho dalším zpracování a na celkovém výrobním čase.

3.1 Dělení materiálů kapalinovým paprskem

Řezání je dělicí proces způsobený silovým, napětovým a deformačním účinkem dělicího nástroje na materiál obrobku, přičemž nástrojem je zde vysokorychlostní proud vody. Výsledkem dělicího procesu je dělicí řez.

Při dělení materiálu pomocí kapalinového paprsku dochází k odstranění malého množství materiálu z místa řezu – řezné mezery. Řezný nástroj – kapalinový paprsek, je flexibilní nástroj, který je schopen obrábět všechny známé materiály [27].

V současné praxi nacházejí nejširší uplatnění dva základní způsoby dělení kapalinovým paprskem. A to dělení čistým kapalinovým paprskem (WJ) a abrazivním kapalinovým paprskem (AWJ). Problematikou hydroabrazivního dělení materiálů se v České republice zabývá např. Oddělení dezintegrace materiálů Ústavu geoniky AV ČR Ostrava, v.v.i., Oddělení kapalinového paprsku Institutu fyziky VŠB-TUO, AWAC Praha a mnoho dalších.

3.1.1 Čistý kapalinový paprsek WJ

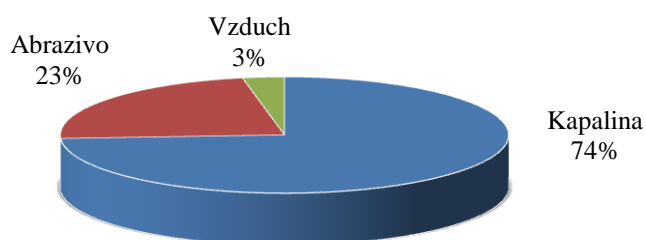
Jako nosné prostředí se používá nejčastěji voda, ale také mléko, kakao, rostlinné oleje, minerální oleje, líh, alkohol, glycerin apod.

System plně využívá vlastnosti vody při vysokých tlacích. Používá se voda z vodovodu, případně jsou z ní odstraněny usazeniny (rozpuštěné a nerozpuštěné minerály). Vzhledem ke stabilizaci vodního paprsku v důsledku lepších řezacích vlastností se mohou do

paprsku přimíchávat přísady, např. dlouhé řetězcové polymery za účelem stabilizace kapalinového paprsku [16].

3.1.2 Abrazivní kapalinový paprsek AWJ

Abrazivní vodní paprsek je v podstatě třífázový (obsahuje pevné – kapalně – plynné skupenství), viz obr. 3.1. Je to kontinuální kapalinový paprsek, do kterého se přidávají pevné částice malého průměru, tzv. abraziv [15].



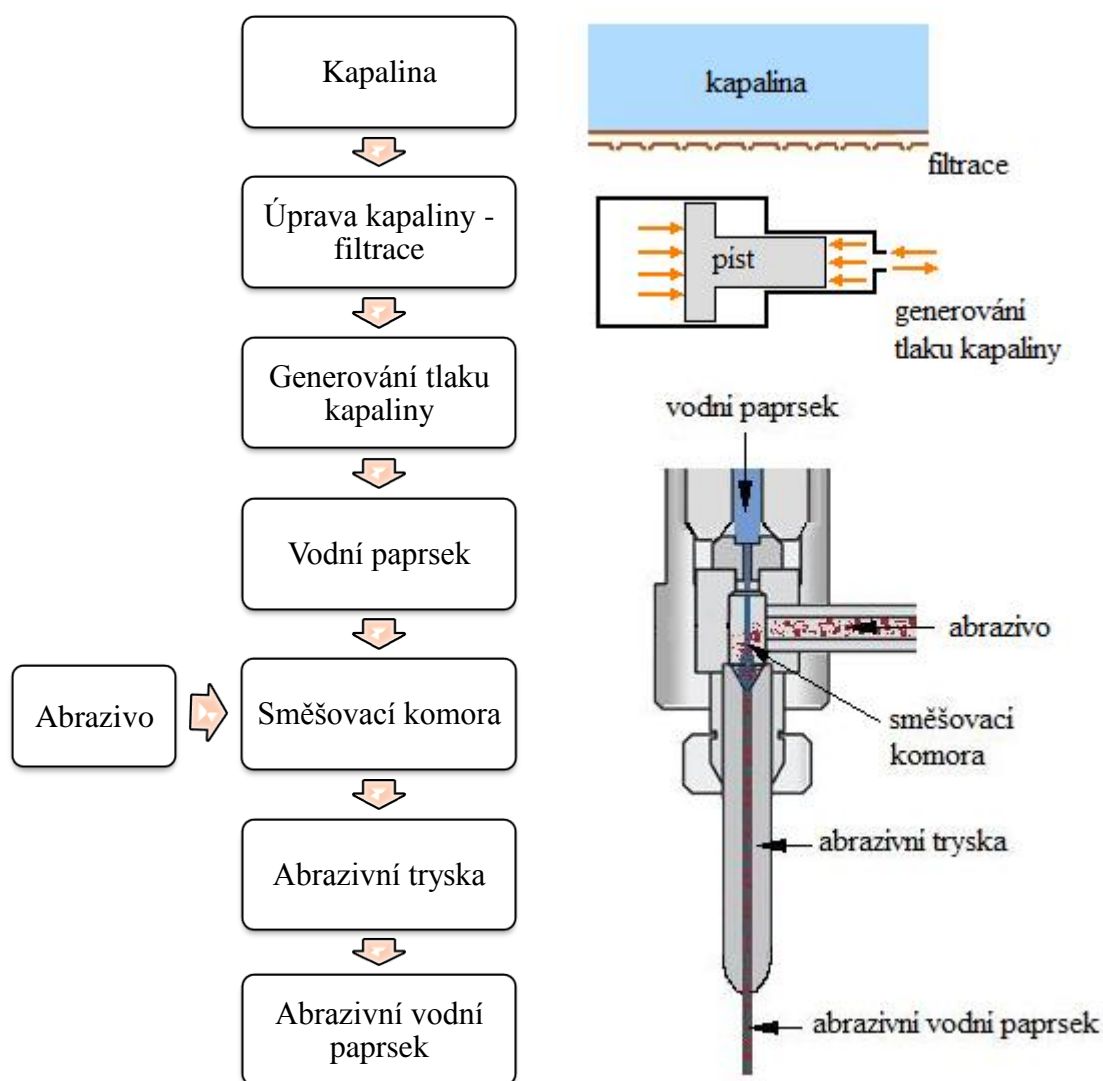
Obrázek 3.1 - Hmotnostní poměr jednotlivých složek nástroje [19]

3.2 Charakteristika technologie AWJ

Princip obrábění kapalinovým paprskem spočívá v generování vysokého tlaku kapaliny (nejčastěji vody), která při protékání tryskou malého průměru získává velmi vysokou kinetickou energii. Tím vzniká flexibilní nástroj, který je schopen obrábět téměř všechny technické materiály [23].

Vzhledem k tomu, že řezné médium je v převážné míře abrazivo s vodou, kde abrazivo je obalené vodní mlhou, nedochází k lokálnímu přehřívání materiálů v místě řezu. Okolí základního materiálu v místě řezu není tedy ani ovlivněné tepelně. Teplota v místě řezu se pohybuje okolo 50 °C.

Hlavní oblasti procesu vzniku, formování a působení nástroje na obráběný materiál vidíme na obr. 3.1. Jednotlivé technologické etapy vzniku, formování a působení AWJ na obráběný materiál jsou podrobněji popsány v literatuře [8], [14], [15], [16], [23], [29], [30].



Obrázek 3.1 - Schéma vzniku a formování řezného nástroje AWJ

3.2.1 Nástroj

3.2.1.1 Řezná voda – úprava řezné vody

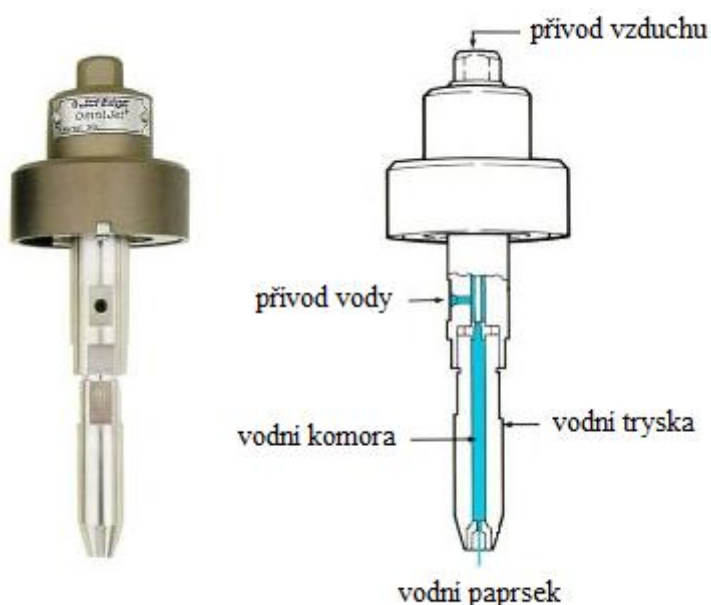
Voda je nejdostupnější, nejlevnější a je ekologická. Pro snížení počtu oprav a míry opotřebování trysek, otočných kloubových spojů, ovládání ventilů, těsnění, atd., se provádí filtrace, změkčování a deionizace řezací vody. Celková tvrdost vody by neměla překročit hodnotu $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

Při dělení materiálů čistým a abrazivním kapalinovým paprskem se v zařízeních používají dva druhy trysek, které jsou uloženy v řezacích hlavicích. Každá z trysek má odlišný tvar a funkci a jsou vyrobené z odlišných materiálů. Jsou to:

- trysky na dělení materiálu čistou vodou,
- trysky na dělení materiálu abrazivním vodním paprskem.

3.2.1.2 Vodní trysky

Vodní tryska vytváří a formuje vysokorychlostní proud kapaliny, čímž významně ovlivňuje kvalitu a produktivitu dělení kapalinovým paprskem. Příklad konstrukčního provedení řezné hlavice s vodní tryskou je na obr. 3.2.



Obrázek 3.2 - Základní konstrukce řezné hlavice s vodní tryskou [32]

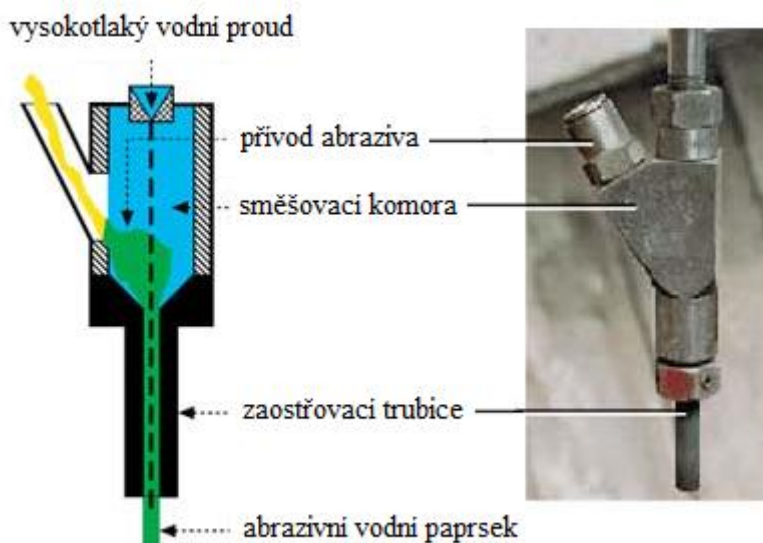
Životnost trysek (tab. 3.1) závisí na druhu a kvalitě nosného prostředí. Proto se voda pro aplikaci řezání upravuje základní filtrací, potom eventuálně demineralizací, deionizací. Použití tvrdé a chemicky neupravené vody snižuje životnost trysek až 5-ti násobně [15].

Tabulka 3.1 - Životnost trysek [15], [35]

Materiál	Životnost	Popis
Standard karbid wolframu	4 – 6 hod	Byly to původní směšovací trysky. Dlouho se nepoužívali, kvůli jejich nízké výkonnosti a poměru cena/hodina. Mají sklon k mimo osovému opotřebením, požadují velmi častou výměnu.
Levný kompozitní karbid	35 – 60 hod	Vhodné pro hrubé řezání, nebo když se zaučuje nový operátor.
Střední životnost kompozitní karbid	80 – 90 hod	Vhodné pro všechny trysky.
Premium kompozitní karbid	100 – 150 hod	Nejlepší. Tato oblíbená tryska se projevuje souosým a předvídatelným opotřebením. Užívá se pro přesné i každodenní práce.

3.2.1.3 Abrazivní trysky

Abrazivní tryska (viz obr. 3.3) se používá pro přívod abraziva do proudu řezné kapaliny s vysokým tlakem (viz tab. 6.1), která přitéká přívodním potrubím do řezné hlavice a protéká vodní tryskou. Při vtékání vodního proudu do rozšiřujícího se prostoru vzniká podtlak přibližně 0,05 MPa, kterým se přes přísávací potrubí přísává abrazivo ze zásobníku, které je následně ve směšovací komoře abrazivní hlavice strháván proudem vody, která mu dává část své kinetické energie. Směs abraziva a vody je usměrněna zaostřovací trubicí. Alternativou je přivádění abraziva pod určitým tlakem do směšovací hlavice abrazivní trysky [16], [30].



Obrázek 3.3 - Abrazivní řezná hlavice [31]

3.2.1.4 Abrazivo

Volba abraziva nám výrazně ovlivňuje proces řezání. Jako abrazivní prostředek se používá především granát, korund, skleněné perly, ocelové broky, ocelový písek, litinový písek, ocelové kuličky. Výběr správného materiálu je velmi důležitý, jelikož náklady na abrazivo představují největší položku při dělení AWJ [17]. Při výběru musíme proto volit kompromis mezi faktory:

- tvrdost abraziva,
- velikost abrazivních zrn,
- tvar abrazivních zrn,
- hmotnostní tok abraziva,
- ekologičnost abraziva,
- cenová dostupnost.

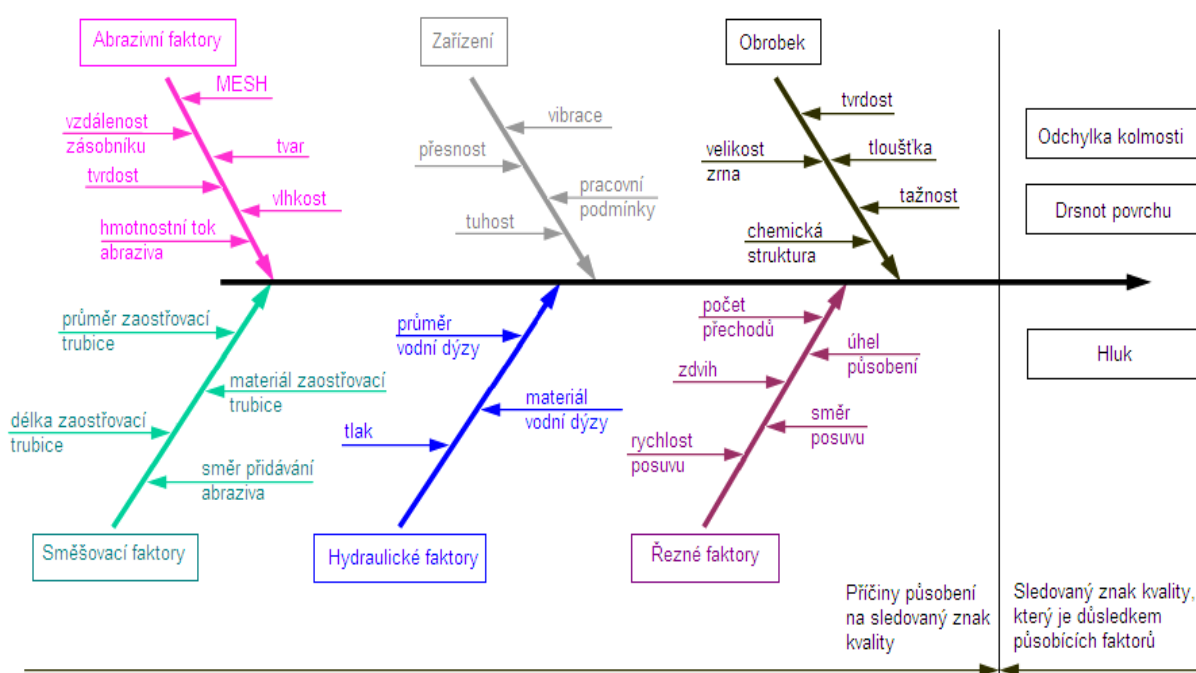
Při zvýšení hmotnostního toku abraziva lze dosáhnout vyšší rychlosti řezání při současném zachování jakosti povrchu obrobku. Efektivita dávkování abrazivních zrn je však limitována. Pokud je abrazivních zrn v kapalinovém paprsku mnoho, dochází k jejich vzájemnému srážení v prostoru vznikající mezery v řezaném materiálu.

4 TECHNOLOGICKÉ FAKTORY

Na výslednou kvalitu obrobené plochy a úběr materiálu mají velký vliv faktory AWJ, a to přímé a nepřímé faktory, které budou dále rozebírány za účelem kvalitativního určení jejich významu.

4.1 Charakteristika přímých a nepřímých faktorů

Faktory, které ovlivňují kvalitu obrobené plochy (graficky je znázorněn jejich vliv na obr. 4.1) se rozdělují do dvou skupin, a to do skupin nepřímých a přímých procesních faktorů.



Obrázek 4.1 - Vliv vstupních faktorů na jakost [25]

Do první skupiny patří nepřímé faktory, pomocí kterých se vytváří počáteční nástroj, tj. AWJ (viz tab. 4.1) [16].

Tabulka 4.1 - Nepřímé faktory

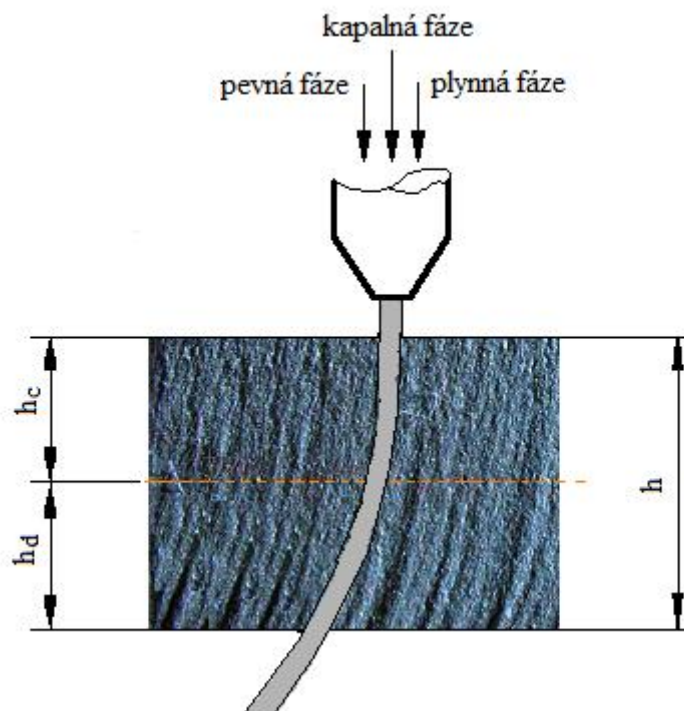
Faktory	Druh	Označení	Jednotka
Hydraulický	Tlak čerpadla	p_p	[Pa]
	Tlak kapaliny	p	[Pa]
	Průměr vodní trysky	d_o	[mm]
Směšovací	Průměr zaostřovací trubice	d_a	[mm]
	Délka zaostřovací trubice	l_a	[mm]
	Přívod abraziva		
Abrazivní	Hmotnostní tok	m_a	[kg.min ⁻¹]
	Průměr částice	d_p	[mm]
	Tvar abraziva		
	Tvrdost abraziva	H_p	[N·mm ⁻²]

Do skupiny nepřímých faktorů, které ovlivňují kvalitu počátečního nástroje, patří: hydrodynamické, směšovací a abrazivní faktory. Tyto faktory charakterizují kvalitu a energetickou hodnotu vysokorychlostního hydroabrazivního proudu. Vytvořený nástroj pomocí nepřímých faktorů vstupuje do technologického procesu úběru materiálu pomocí přímých faktorů (viz tab. 4.2).

Tabulka 4.2 - Přímé faktory

Faktory	Druh	Označení	Jednotka
Faktory dělení	Rychlost posuvu	v_p	[mm.min ⁻¹]
	Směr posuvu	s	[°]
	Počet přechodů	n_p	[1]
	Zdvih	x	[mm]
	Úhel působení	φ	[°]
	Tloušťka materiálu	h	[mm]

Pomocí těchto faktorů (viz obr. 4.2) se vytváří obrobená plocha jako obalová plocha trajektorie pracovního pohybu AWJ.



Obrázek 4.2 - Vliv přímých faktorů na obrobenou plochu děleného materiálu

Pracovní povrch proudu se skládá z kapalně, pevně a plynně fáze. Pevnou fází tvoří abrazivní částice, které vysokou rychlostí dopadají na horní erozní část cílového materiálu (řezná zóna). Dolní erozní část cílového materiálu podléhá plastickým deformacím (deformační zóna). Základním principem úběru materiálu AWJ je spolupůsobení kapalně a pevně fáze, kde úběr materiálu se uskutečňuje jako důsledek erozivního působení, přesněji hydroabrazivního dělení [23].

4.2 Významnost vlivu faktorů AWJ

Analýza faktorů AWJ dokazuje, že největší vliv na proces řezání materiálů a jeho efektivnost mají hydraulické parametry (tlak p , průměr vodní trysky d_o) a parametry abraziva (druh abrazivního materiálu, velikost abrazivních částic a_o , hmotnostní tok abraziva m_a). Z parametrů směšování mají největší vliv průměr d_a a délka l_a usměrňovací trubice. Z faktorů dělení nejvíce působí postupová rychlost v_p a tlak kapaliny generovaný čerpadlem. Z výsledků této analýzy je sestavena tabulka významnosti vlivu nejdůležitějších parametrů AWJ na řezné výsledky a na kvalitu řezných ploch, zastoupenou v tab. 4.3 parametry vlnitosti a drsnosti povrchu. Funkční vztahy hlavních parametrů struktury povrchu k režimovým parametrům

technologie AWJ byly získány a potvrzeny mnoha experimentálními výsledky četných autorů v podání grafickém i analytickém [22].

Tabulka 4.3 - Významnost vlivu parametrů AWJ na technologicko - konstrukční faktory

	Parametry AWJ							
	p [Pa]	d_o [m]	d_a [m]	l_a [m]	m_a [kg·s ⁻¹]	zrnitost [mesh]	mat. abr.	v_p [m·s ⁻¹]
objem odebraného materiálu	3	3	2	1	3	2	2	3
hloubka řezu	3	3	2		3	2	2	3
opotřebení abrazivní trysky	2	2	2	1	2	2	3	
provozní náklady	3	1	1	1	2	2		2
vlnitost povrchu	2	2	1	1	2	1	1	2
drsnot povrchu	2	2			1	3	2	2
fragmentace částic	2	1	1	1	1	1	3	
účinnost promíchání	1	2	2	1	2	1		
šířka řezu	1		3		1			
cena zařízení	3	1						1
spolehlivost práce	2	1					1	1
ekologie	1	1					2	
rozšíření paprsku	1	2						
koeficient proudění	1	2						
hydraulická účinnost	1	2						
koherence paprsku				1	1			
tepelné ovlivňování	1					1		
zpevnění materiálu	1		1					

Parametry v tab. 4.3 jsou seřazeny podle významnosti vlivu parametrů AWJ, a to od nejvýznamnějšího po méně významné parametry.

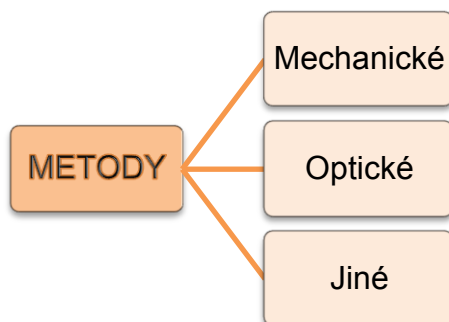
Legenda: 1 - malá významnost,
2 - velká významnost,
3 - maximální významnost [9], [16], [22].

5 METODY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

Kontrola topografie vytvořených povrchů, posuzování a hodnocení splnění předepsaných požadavků na jakost je zejména v dnešní době velmi významná část při výrobě obrobků a to u všech používaných typů technologií, které nám slouží k jejich vytvoření.

5.1 Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu

Metody hodnocení a přístroje pro měření topografie povrchu jsou velmi podrobně popsány v literatuře [5]. Pro účely mé diplomové práce je dostatečně účelné tyto metody zjednodušeně rozdělit na tři základní skupiny podle upraveného schématu obr. 5.1. Tento způsob rozdělení metod bude sloužit k zjišťování kvality povrchu materiálů vytvořených hydroabrazivním dělením.



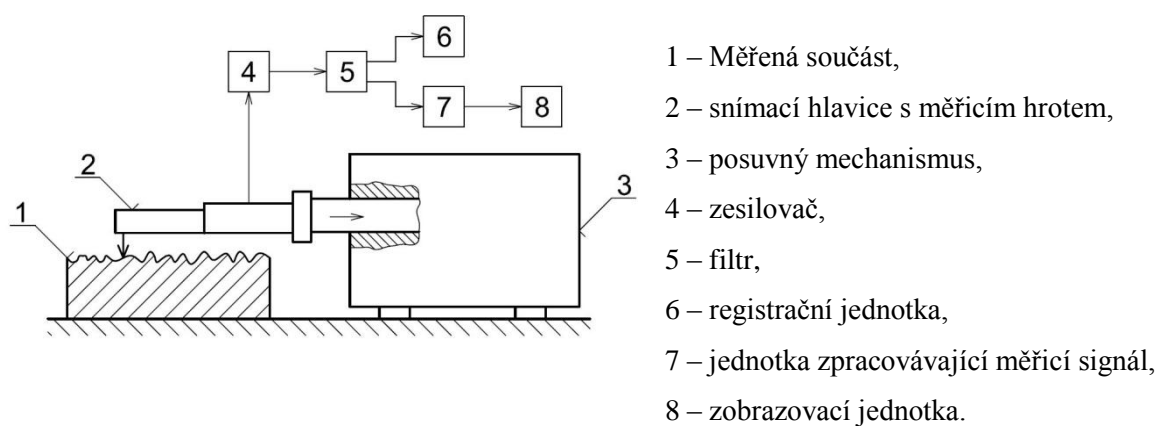
Obrázek 5.1- Zjednodušené rozdělení metod hodnocení a měření drsnosti povrchu [22]

5.1.1 Mechanické metody

Mechanické metody jsou nejvíce rozšířené metody, které se používají ve strojírenství při kontrole jakosti povrchu. Výhody a nevýhody hodnocení topografie povrchu pomocí mechanické metody jsou shrnuty v tab. 5.1. Na trhu je dostupná široká škála technicky různě provedených přístrojů pracujících na mechanickém principu. Mohou být v provedení lehčím, přenosném, tedy mobilním nebo v provedení stacionárním. Senzorem je mechanický hrot různé velikosti a geometrického tvaru, který snímá povrch v podobě primárního mechanického signálu a tento signál převádí na elektrický. Jsou schopny měřit s vysokou přesností řádu 10^{-9} m a měřením postihovat rozsáhlý soubor normovaných i nenormovaných

parametrů topografie povrchu. Vykazují vysoký stupeň automatizace a technické dokonalosti provozu v oblasti klasických strojírenských obráběcích technologií.

Při měření povrchu byl použit přístroj HOMMEL TESTER T8000. Kontaktní profilometr (viz obr. 5. 2) se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanickou část tvoří stolek, na který se ukládá měřená součást a stojan, po němž se svisle posouvá zařízení s ramenem opatřeným snímačem. Snímač má tvar hrotu. Elektronická část transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem na signál elektrický, který se po zpracování interpretuje jako číselná hodnota zvoleného parametru struktury povrchu, popř. jako grafický záznam.



Obrázek 5.2 - Schematické znázornění principu kontaktního profilometru [20]

Tabulka 5.1 - Výhody a nevýhody mechanické metody

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> ➤ žádné apriorní předpoklady o měřeném povrchu, ➤ velký rozsah rozlišení ve směru kolmém na plochu, ➤ přímé měření parametrů topografie povrchu, ➤ vysoká rozlišovací schopnost, ➤ možná kalibrace výsledků z nepřímých metod vzhledem k přímému měření. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ nadměrná selektivnost získaných informací, ➤ destrukce povrchů u měkkých materiálů, ➤ relativně pomalý pohyb hrotu po měřeném povrchu, ➤ problémem je rezonanční frekvence snižující kvalitu primárního signálu, ➤ chybějící kontinuální kontrola a řízení kvality povrchu, ➤ nemožnost dálkového řízení.

5.1.2 Optické metody

Od minulého století zaznamenáváme intenzivní vývoj měřicích metod topografie povrchu, který je založen na principech optických teorií analýzy mikrogeometrie povrchu pevných látek. Efektivita a operativnost optických profilometrů je zpravidla vyšší než u mechanických, jelikož umožňují nedestruktivně a bezkontaktně měřit povrchy mikrostruktury. Optické metody jsou schopny světelným paprskem nepřímo kopírovat zdrsňený povrch a dávat nám velký počet technicky užitečných informací o jeho charakteru. Měřicí postupy jsou často jednodušší a rychlejší, než u kontaktních profilometrů.

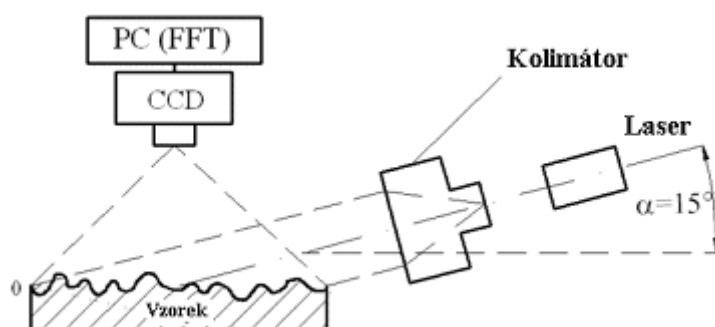
Hodnocení struktury povrchu optickými metodami je založeno na interakci světla s nerovnostmi povrchu. Na měřený povrch je optickou soustavou promítán světelný svazek, který po odrazu od měřeného povrchu prochází opět zobrazovací soustavou a dopadá na detektor, CCD kameru aj. Následuje zpracování signálu a interpretace výsledků. Dopadající světlo je charakterizováno stupněm kolimace, koherencí a polarizací. Odrazem světelného svazku se vlivem mikrostruktury povrchu mění stupeň kolimace, amplituda, fáze, a otočení polarizační roviny primárního světelného svazku [15].

Optickou metodou, kterou byly proměřeny vzorky, je stínová metoda (viz obr. 5.3). Dále byly vzorky proměřeny pomocí optického profilometru MicroProf FRT v základním provedení s optickým senzorem CHR 150 N (viz obr. 6.3), kde vzorek je umístěn na skenovacím stolku, jehož velmi rychlý a přesný pohyb v definovaných liniích nepohybujícím se senzorem umožňuje získat údaje o topografii studovaného povrchu nejen podél zvolené linie, ale z celé plochy povrchu. Senzor optického profilometru získává potřebná data nezávisle z každého měřicího bodu, což vede k vysoké rychlosti měření [23].

Porovnání výhod a nevýhod zde popisované stínové metody je uvedené v tab. 5.2.

Tabulka 5.2 - Výhody a nevýhody optické metody

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> ➤ bezkontaktnost, ➤ nedestruktivnost, ➤ vysoká informativnost, ➤ opakovatelnost měření, ➤ okamžité výsledky, ➤ integrální charakter výsledků, ➤ schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu, ➤ možnost měření z větší vzdálenosti. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ potřeba apriorních předpokladů, ➤ nepřímé měření parametrů topografie povrchu, ➤ složitější interpretace výsledků, ➤ ztížená korelovatelnost na normované parametry.



Obrázek 5.3 - Schéma měření vzorku stínovou metodou

5.1.3 Jiné metody

Mechanické a optické metody hodnocení topografie povrchu nám vždy nezajistí komplexní charakteristiku měřeného povrchu, proto jsou již desítky let vyvíjeny jiné metody, u kterých se jejich tvůrci snažili vyloučit nevýhody mechanických a optických měření. Prioritním zájmem bylo zajistit bezkontaktnost měření, vyšší hodnotu výstupního signálu, potlačit šumy různého původu a zajistit vhodnou kombinaci s klasickými profilometry a získat paralelní výsledky, aby bylo možno zajistit komplexnější obraz o studovaném povrchu z jediného měření [3], [5]. Některé z nejznámějších metod jsou uvedeny v tab. 5.3.

Tabulka 5.2 - Nemechanické a neoptické metody

Metoda	Popis
RTG	Využívá atomárních vlastností materiálu povrchu po jejich iniciaci rentgenovými paprsky, jejichž vlnová délka je přibližně stejná jako vzdálenost atomu v krystalické mřížce.
SEM	Je založena na analýze proudu elektronů odražených povrchem a kalibraci na parametry struktury povrchu (elektrony jsou urychlovány vysokonapětovým elektrostatickým polem mezi dvěma nebo třemi magnetickými čočkami).
MFM	Umožňuje na základě zmagnetování studovaného vzorku snímat jeho magnetické projevy a jejich analýzou, kalibrací a korelací určit funkční vztahy popisující strukturu povrchu.

5.2 Parametry profilu povrchu

5.2.1 Normované parametry

Drsnost povrchu, tak jak ji stanovuje současná norma, neposkytuje komplexní charakteristiku povrchu, která by nám umožnila získat potřebná data k určení jeho chování za provozu. Důkazem může být to, že dva povrchy, které mají stejnou hodnotu Ra , mohou být zcela rozdílné ve svém chování z hlediska funkčnosti. Normované charakteristiky drsnosti povrchu, které jsou užívané v mých následujících postupech, pro účely zpracování experimentálně naměřených dat v mé diplomové práci, jsou:

Ra – střední aritmetická úchylka profilu,

Rq – střední kvadratická úchylka profilu.

Rz – největší výška nerovnosti profilu.

Střední aritmetická úchylka profilu Ra je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu od vztažené roviny v rozsahu základní délky

$$Ra = \frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx \quad \text{nebo} \quad Ra \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)|, \quad (1)$$

kde je: l_p - měřená délka, [m]
 $y(x)$ - funkce popisující profil, [-]
 $y(x_i)$ - souřadnice n bodů profilu povrchu v mezích
měřené délky, $i = 1, 2, 3 \dots n \dots$ [-]

Střední kvadratická úchylka profilu Rq je kvadratickou analogií parametru Ra a reflektuje jeho časově-prostorový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti nerovností povrchu. Je definována zápisem:

$$Rq = \sqrt{\frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} y^2(x) dx} \quad \text{nebo} \quad Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2(x_i)} \quad (2)$$

Největší výška nerovnosti profilu Rz je výšková charakteristika drsnosti povrchu, určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky [11].

$$Rz = Zp + Zv \quad (3)$$

kde: Zp - výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky l_p [μm]
 Zv - hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky l_p [μm]

5.2.2 Nenormované parametry

Nenormované parametry profilu povrchu slouží pro komplexnost pohledu na topografii povrchu a integrovaně tak doplňují údaje předepsané normou. Dva povrchy, které mají stejnou hodnotu Ra , mohou být zcela rozdílné ve svém chování z hlediska funkční spolehlivosti [5]. Jedná se například o střední aritmetickou vlnovou délku λ_a , která je 2π násobkem poměru střední aritmetické úchylky profilu Ra [μm] a střední hodnoty sklonu profilu Δa [$^\circ$]:

$$\lambda = 2\pi \frac{Ra}{\Delta a} \quad (4)$$

6 VLASTNÍ MĚŘENÍ

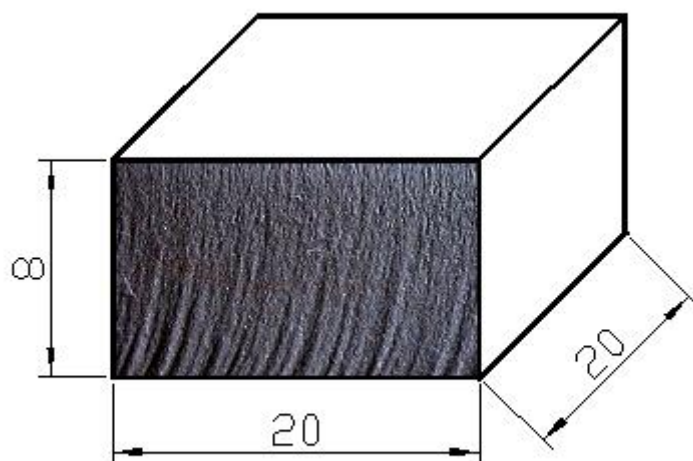
Tato kapitola je věnována přípravě vzorků od nastavení vstupních referenčních technologických parametrů AWJ přes dostatečný soubor ověřovacích měření pomocí různých metod hodnocení topografie povrchu, následnou experimentální analýzu dat až k určení převodních koeficientů mezi měřeným parametrem *RMS* a normovanými parametry.

K definování převodních koeficientů z experimentálního měření bude navrženo účelné matematicko-statistické zpracování dat geometrických parametrů topografie povrchu ve vztahu k vytypovaným technologickým a výkonným parametrům hydroabrazivního dělení materiálů. Následně budou na základě měřeného parametru *RMS* predikovány další geometrické parametry a vytvořen návrh systematické databáze vstupů a výstupů.

6.1 Příprava vzorků

Pro experimentální část mé diplomové práce bylo k dispozici 30 nařezaných vzorků (viz obr. 6.1). Vzorky s rozměrem 8 x 20 x 20 mm byly nařezány hydroabrazivním vodním paprskem z různých kovových materiálů (ČSN 11 375, 13 116, ČSN 17 251, ČSN 411 503, ČSN 422 712, AlCu, AlMg, Dural, Mosaz, Zinek). Při dělení uvedených kovových materiálů vodním abrazivním paprskem byly použity tři druhy abraziva (Austenitický granát, granát Barton, Olivín). Za účelem získat dostatečné množství dat z naměřených vzorků, a následně získat analytické informace o vztahu geometrických parametrů topografie povrchu k parametrům technologickým, byly použity různé metody hodnocení topografie povrchu a to pomocí kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000, optického profilometru MicroProf FRT a CCD kamery využitě při stínové metodě.

V první etapě hodnocení naměřených dat byla použita stínová metoda pro stanovení výškových a podélných fluktuací, analýz signálů intenzity odraženého světla podle distribuce nerovností povrchu. Měření bylo provedeno na kovových materiálech (ČSN 11 375, 13 116, ČSN 17 251, ČSN 411 503, ČSN 422 712, AlCu, AlMg, Dural, Mosaz, Zinek), realizováno na výšce vzorků 8 mm ve 22-ti konvenčně stanovených úrovních s krokem 0,348 mm pro 4 strany opracované různými postupovými rychlostmi ($200, 150, 100$ a $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), a to v 6 různých frekvenčních pásmech (viz obr. 6.2). Pro slitiny hliníku byly použity vyšší postupové rychlosti ($400, 300, 200$ a $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$).



Obrázek 6.1 - Schematické znázornění zkušební vzorku

Hlavní technologické parametry, které byly voleny při opracování 30-ti zkušebních vzorků, jsou uvedeny v tab. 6.1. Tyto parametry nám představují základní technologický režim, který můžeme ve vztahu k různým změnám považovat za referenční.

Tabulka 6.1 - Nastavení experimentu - vstupní referenční technologické parametry

Konstantní faktory	Hodnoty	Konstantní faktory	Hodnoty
Tlak p [MPa]	300	Vzdálenost trysky od povrchu L [mm]	2 mm
Průměr trysky d_o [mm]	0,25	Abrazivní materiál	Granát Barton
Průměr usměrňovací trubice d_a [mm]	0,8	Velikost abraziva	80 Mesh
Délka usměrňovací trubice l_a [mm]	76	Řezací hlava	Flow Inc. Paser III.
Hmotnostní průtok abraziva m_a [g·min ⁻¹]	250	Proměnné faktory	Hodnoty
Tloušťka materiálu h [mm]	8	Posuvná rychlost v_p [mm·min ⁻¹]	50, 100, 150, 200, 300, 400
Charakteristika stroje PTV-37-60			
Multiplikátor	Dvojčinný	Tlak vody (max)	415 MPa
Elektrický příkon	37 kW	Průtok vody (max)	3,68 l·min ⁻¹

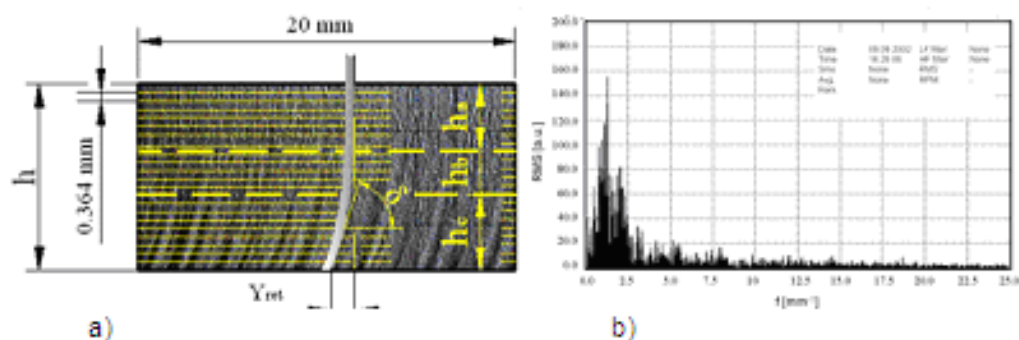
6.2 Měření topografie povrchu vzorků

Jak již bylo dříve zmíněno, pro získání dostatečného množství dat z naměřených vzorků, byly použity různé metody hodnocení topografie povrchu vzorků vytvořených hydroabrazivním dělením a to stínovou metodou, mechanickým a optickým profilometrem.

6.2.1 Stínová metoda

Podle schématu uvedeného na obr. 5.3 byla prototypově sestavena měřicí aparatura, na které byly proměřeny experimentálně připravené vzorky za podmínek uvedených v tab. 6.1. Za účelem dosažení detekce celé plochy jedné strany nařezaných vzorků se uplatnila CCD kamera, která umožnila zrychlení prorastování celých ploch, při rozlišovací schopnosti 0,02 mm dosažené záznamem 1024 pixelů na celé délce vzorku. Byla volena adjustační vzdálenost čočky objektivu 1,4/50 mm okolo 200 mm od měřeného objektu při 0,33 krát zvětšené efektivní oblasti kamery CCD.

Na základě naměřených výsledků s využitím optické měřicí sestavy (viz obr. 5.3) byly získány hodnoty *RMS* intenzity reflektovaného světla. Analýza dat byla provedena Fourierovou transformací, spektrální dekompozicí a frekvenční pásmovou filtrací (obr. 6.2), za účelem získání *RMS* a charakteru transformačních rovnic mezi *RMS* a parametry drsnosti povrchu.

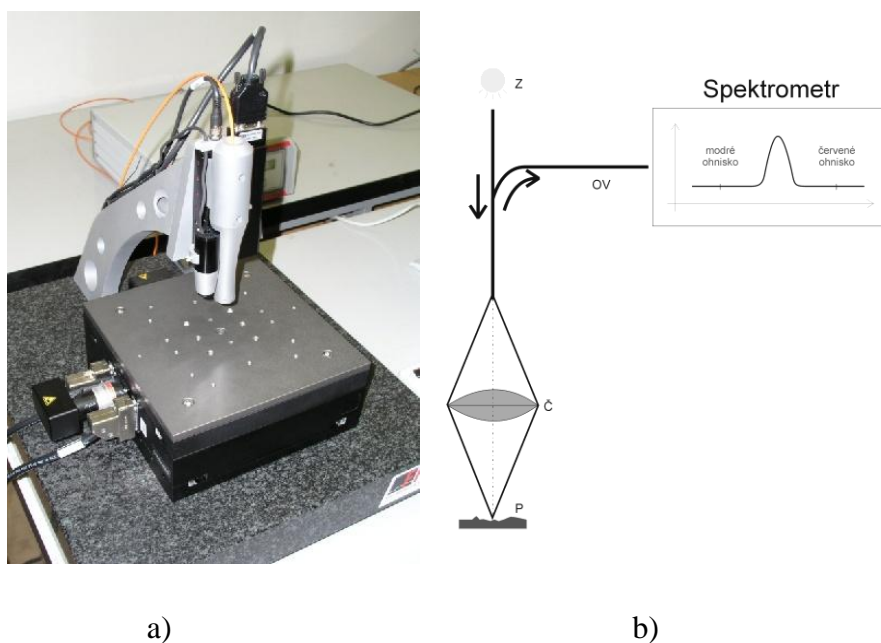


Obrázek 6.2 - a) Fotografie povrchu dělicí řezné stěny (zvětšeno 12krát), kde Y_{ret} je zakřivení stopy AWJ, h_a je iniciační a hladká, h_b je přechodná hloubka, h_c je zřýhovaná hloubka a δ je deviační úhel, b) Amplitudově-frekvenční spektrum získané ze signálu z vodorovné měřické linie o délce 20 mm v hloubce 6 mm od povrchu, na vzorku u oceli ČSN 17 251

Za účelem komparace získaných dat z měření stínovou metodou na vzorcích vytvořených podle tab. 6.1 byly tyto vzorky měřeny kontaktním profilometrem HOMMEL TESTER T8000 (viz obr. 5.2) a optickým profilometrem MicroProf FRT.

6.2.2 Optický profilometr MicroProf FRT

Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT v základním provedení s optickým senzorem CHR 150 N je na obr. 6.3.



Obrázek 6.3 - a) je optický profilometr MicroProf FRT a b) princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT v základním provedení s optickým senzorem CHR 150 N

Na obr. 6.3 b) je Z zdroj bílého světla (halogenová výbojka), OV optické vlákno, \check{C} čočka s velkou chromatickou aberací, P studovaný povrch, přičemž spektrometr analyzuje spektrální rozdělení intenzity světla odraženého od povrchu [23].

6.3 Experimentální analýza dat

Nerovnosti na vytvořené dělicí ploše na vzorcích můžeme konvenčně klasifikovat na mikroskopické a makroskopické. V horní části dělicího řezu jsou kvalifikovány jako mikroskopické a tvoří je převážně nerovnosti řádu drsnosti. Nerovnosti na spodní části dělicího řezu jsou již makroskopické s výskytem tzv. rýhování, drážkování povrchu a nerovností řádu vlnitosti. Hloubka, kdy dochází k poměrně rychlé změně mechanismu dezintegrace od převážně smykového porušování po drcení materiálu vzorku tlakem, je v literatuře označována podle Hashishe jako kritická hloubka h_c . Kritická hloubka má funkční závislost na řadě technických parametrů jako jsou hmotnostní průtočné množství abraziva, posuvná rychlost řezné hlavy, rychlost pohybu abrazivních částic, hmotnost abrazivních částic, průměr AWJ, efektivní podíl částic v dělicím řezu a další [22], [23], [26].

Jak vyplývá z vykonaných experimentů, s rostoucí hloubkou h dělicího řezu klesá kinetická energie paprsku a tím rostou nerovnosti povrchu, tj. rostou jejich výškové amplitudy a současně se snižují jejich prostorové frekvence. Je to způsobeno tím, že se mění mechanismus úběru materiálu, a to z převládajícího tahového a smykového napětí na tlakové napětí.

Z provedených 22-ti měřených linií bylo získáno 22 signálů a z těchto signálů pomocí FFT bylo získáno 22 amplitudově-frekvenčních spekter. Každé spektrum je reprezentováno parametrem RMS , což je výstupní signál, který vyhodnocujeme pomocí stínové metody. Tento parametr je lineárně vázán k parametru Ra podle empiricky získaného vztahu

$$RMS = k_S Ra, \quad (5)$$

kde k_S je konstanta závislá na přístroji. Celková hodnota RMS reprezentuje jeden signál, který je zpracován FFT a je definován jedním bodem (pro $RMS = f(l_p)$) [23].

Na základě analýzy experimentálně zjištěných dat z vlastních měření a následné interpretace výsledků byly jako hlavní parametry pro dostačující popis geometrie povrchu dělicí stěny vytvořené hydroabrazivním dělením za vstupních podmínek (viz tab. 6.1) navrženy: střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm], střední kvadratická úchylka profilu Rq [μm], největší výška nerovnosti profilu Rz [μm], deviační úhel řezné stopy δ [$^\circ$], retardace řezné stopy Y_{ret} [mm] a hloubka h [mm]. Tyto parametry považuji za důležité a dostačující pro popis topografie nově vzniklých povrchů a tím i pro hodnocení celkové kvality řezného

procesu, které patří mezi výstupní veličiny navrhované databanky. Pro účely kvalifikovaných matematicko-statistických a fyzikálních analýz vztahů mezi finální jakostí povrchů, obráběným materiálem a volbou technologických parametrů řezného procesu je zapotřebí do oblasti experimentální analýzy dat zahrnout i další výstupní veličiny jako je energetická charakteristika proudu a konečná spotřeba energie. Uvedené parametry jsou významnou součástí při celkovém pohledu na výkon řezání a jakost řezu při použití technologie AWJ. Ve své práci se těmito parametry budu zabývat v další podkapitole.

Získané hodnoty RMS pomocí stínové metody (obr. 5.3), umožňují sledovat i další vztahy k jiným geometrickým a optickým charakteristikám povrchové vrstvy (viz tab. 6.5), korelační vztahy popisující mechanismus dezintegračního procesu i okamžitý napěťově-deformační stav řezu a obráběného materiálu. Geometrickou a optickou charakteristiku povrchové vrstvy z hlediska distribuce hodnot RMS a hodnot výškových fluktuací lze částečně charakterizovat implicitním vztahem:

$$RMS_i, Ra_i = f(h_i, \lambda_{Si}, Sm_i, \Delta a_i, Y_{reti}, r_{yyi}, R_{Si}, S(\theta)_i \dots), \quad (6)$$

kde uváděné parametry odpovídají okamžitým hodnotám měření v daných měřicích liniích:

h_i	-	hloubka dělicího řezu [mm],
λ_{Si}	-	vlnová délka výškových fluktuací povrchu [mm],
Sm_i	-	rozteč výškových nerovností [mm],
Δa_i	-	sklon nerovností [°],
Y_{reti}	-	zpoždění (retardace) stopy paprsku [mm],
r_{yyi}	-	normovaná autokorelační funkce [-],
R_{Si}	-	reflexe dopadajícího světla povrchem [-],
$S(\theta)_i$	-	stínová funkce [-],
δ_i	-	úhel deviace dělicí řezné stopy [°].

6.4 Převodní koeficienty

Mezi hlavní parametry popisující geometrii povrchu dělicí stěny byly, mimo jiné, navrženy: střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm], střední kvadratická úchylka profilu Rq [μm] a největší výška nerovnosti profilu Rz [μm]. Pro stanovení převodních koeficientů bylo nutné provést matematicko-statistické zpracování naměřených dat pomocí stínové metody (s využitím CCD kamery), optické metody (pomocí optického profilometru MicroProf FRT) a mechanické metody (s využitím kontaktního profilometru HOMEL TESTER T8000). Získané hodnoty RMS ze stínové metody byly porovnány s hodnotami Ra , Rq , Rz naměřenými pomocí optického profilometru MicroProf FRT a kontaktního profilometru HOMEL TESTER T8000 a byly stanoveny hodnoty převodních koeficientů podle vztahu (5) pro jednotlivé materiály a řezné rychlosti, kterými byly vzorky vytvořeny.

Tabulka 6.2 - Převodní koeficienty z RMS na Ra , Rq , Rz pro materiál ČSN 17 251 opracovaný postupovými rychlostmi 200 a 150 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Řez	$v = 200 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$				$v = 150 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$			
	RMS	$Ra = \frac{RMS}{30}$	$Rq = \frac{RMS}{25}$	$Rz = \frac{RMS}{5}$	RMS	$Ra = \frac{RMS}{45}$	$Rq = \frac{RMS}{35}$	$Rz = \frac{RMS}{6}$
1	157,1	5,24	6,29	31,43	159,5	3,55	4,56	26,59
2	155,6	5,19	6,23	31,13	173,3	3,85	4,95	28,89
3	159,0	5,30	6,36	31,81	161,9	3,60	4,63	27,00
4	149,2	4,98	5,97	29,85	154,0	3,42	4,40	25,67
5	129,6	4,32	5,19	25,93	156,6	3,48	4,48	26,11
6	144,1	4,80	5,77	28,83	158,5	3,52	4,53	26,43
7	179,0	5,97	7,16	35,81	155,3	3,45	4,44	25,90
8	174,9	5,83	7,00	34,98	184,3	4,10	5,27	30,73
9	167,2	5,57	6,69	33,44	186,9	4,15	5,34	31,16
10	159,6	5,32	6,39	31,93	190,5	4,23	5,44	31,75
11	172,4	5,75	6,90	34,48	215,1	4,78	6,15	35,86
12	200,4	6,68	8,02	40,09	200,3	4,45	5,72	33,38
13	180,9	6,03	7,24	36,19	208,7	4,64	5,96	34,79
14	184,3	6,14	7,37	36,86	207,7	4,62	5,93	34,62
15	194,2	6,47	7,77	38,84	217,8	4,84	6,22	36,31
16	199,7	6,66	7,99	39,95	193,0	4,29	5,52	32,17
17	175,7	5,86	7,03	35,14	209,7	4,66	5,99	34,96
18	210,1	7,01	8,41	42,04	200,1	4,45	5,72	33,36
19	213,7	7,12	8,55	42,74	199,0	4,42	5,69	33,18
20	197,5	6,58	7,90	39,50	212,9	4,73	6,08	35,48
21	214,1	7,14	8,57	42,83	190,7	4,24	5,45	31,79
22	213,2	7,11	8,53	42,66	180,7	4,02	5,16	30,12

Tabulka 6.3 - Převodní koeficienty z RMS na Ra , Rq , Rz pro materiál ČSN 17 251
opracovaný postupovými rychlostmi 100 a 50 mm·min⁻¹

Řez	$v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$				$v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$			
	RMS	$Ra = \frac{RMS}{55}$	$Rq = \frac{RMS}{45}$	$Rz = \frac{RMS}{8}$	RMS	$Ra = \frac{RMS}{60}$	$Rq = \frac{RMS}{50}$	$Rz = \frac{RMS}{9}$
1	185,9	3,38	4,13	23,24	166,8	2,78	3,34	18,54
2	225,4	4,10	5,01	28,18	195,4	3,26	3,91	21,72
3	228,5	4,16	5,08	28,57	214,9	3,58	4,30	23,88
4	207,0	3,76	4,60	25,88	201,5	3,36	4,03	22,40
5	212,9	3,87	4,73	26,62	184,3	3,07	3,69	20,49
6	188,3	3,42	4,19	23,55	178,0	2,97	3,56	19,78
7	199,5	3,63	4,43	24,94	182,4	3,04	3,65	20,28
8	203,1	3,69	4,51	25,39	186,6	3,11	3,73	20,73
9	210,3	3,83	4,68	26,30	177,7	2,96	3,55	19,75
10	197,5	3,59	4,39	24,69	187,0	3,12	3,74	20,78
11	236,6	4,30	5,26	29,58	188,7	3,15	3,78	20,97
12	210,4	3,83	4,68	26,30	212,4	3,54	4,25	23,61
13	198,9	3,62	4,42	24,87	235,7	3,93	4,71	26,19
14	204,3	3,72	4,54	25,54	209,7	3,50	4,19	23,30
15	224,7	4,09	5,00	28,10	233,3	3,89	4,67	25,92
16	230,9	4,20	5,13	28,87	213,3	3,56	4,27	23,71
17	223,0	4,05	4,96	27,88	212,5	3,54	4,25	23,61
18	203,5	3,70	4,52	25,44	192,5	3,21	3,85	21,40
19	226,0	4,11	5,02	28,25	211,5	3,53	4,23	23,51
20	206,9	3,76	4,60	25,87	189,5	3,16	3,79	21,06
21	194,9	3,55	4,33	24,37	192,6	3,21	3,85	21,41
22	165,0	3,00	3,67	20,64	167,3	2,79	3,35	18,59

V tab. 6.2 a 6.3 jsou pro materiál ČSN 17 251 predikovány přepočtové koeficienty z naměřené hodnoty RMS na Ra , Rq , Rz , na vzorku, jehož 4 strany byly opracované různými postupovými rychlostmi (200, 150, 100 a 50 mm·min⁻¹). Hodnoty, které byly využity pro výpočet převodních koeficientů, byly získány v rámci projektů IGS516/6 a IGS2103/516.

Pomocí experimentálně stanovených přepočtových vztahů (viz tab. 6.2 a 6.3) pro normované parametry Ra , Rq a Rz jsem sestrojila grafické znázornění (obr. 6.5) vypočtené drsnosti povrchů vytvořených postupovými rychlostmi 200, 150, 100 a 50 mm·min⁻¹, kdy z naměřené hodnoty RMS přepočtem získáváme drsnost Ra . Srovnání matematicko-statisticky vypočítané hodnoty $Ra=f(RMS)$ se skutečně naměřenou drsností Ra z optického profilometru MikroProf FRT je uvedeno v tab. 6.4.

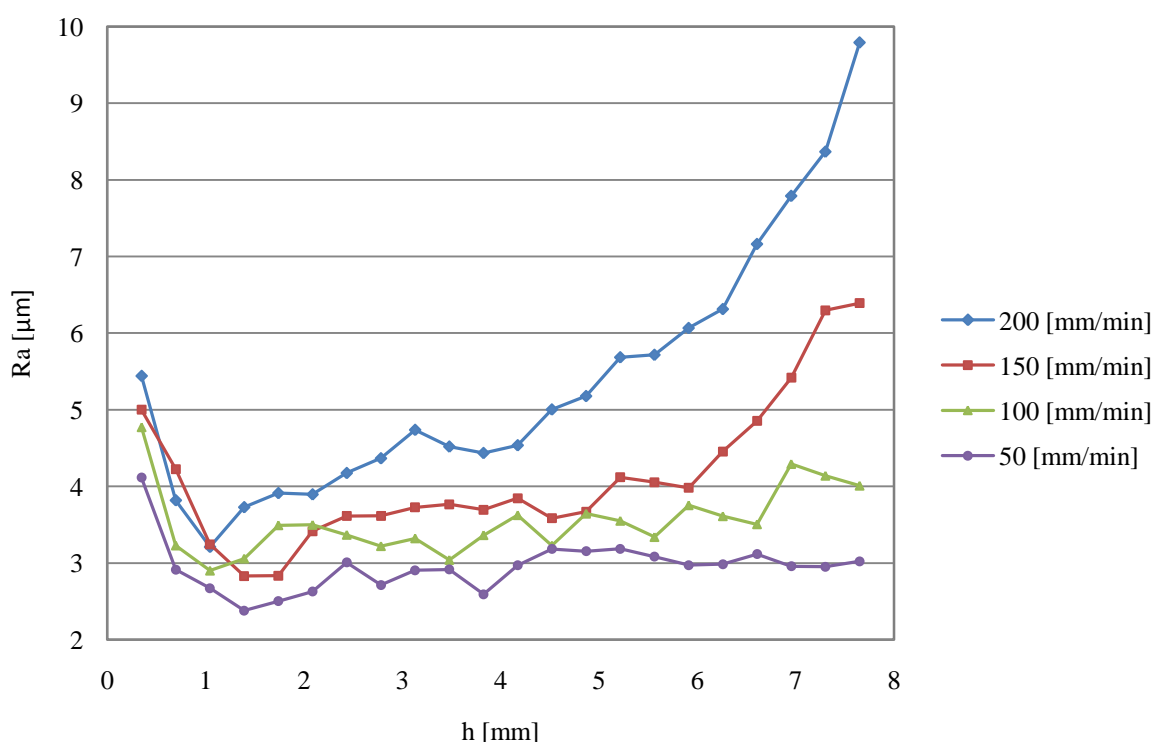
Tabulka 6.4 - Porovnání vypočtené drsnosti $Ra=f(RMS)$ se získanými daty Ra z optického profilometru MikroProf FRT pro materiál ČSN 17 251 opracovaný postupovými rychlostmi 200, 150, 100 a 50 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$

		Ra [μm]							
		$v = 200 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$		$v = 150 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$		$v = 100 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$		$v = 50 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	
Řez číslo	h [mm]	$\frac{RMS}{30}$	MicroProf FRT	$\frac{RMS}{45}$	MicroProf FRT	$\frac{RMS}{55}$	MicroProf FRT	$\frac{RMS}{60}$	MicroProf FRT
1	0,35	5,24	5,44	3,55	5,00	3,38	4,77	2,78	4,12
2	0,70	5,19	3,82	3,85	4,23	4,10	3,23	3,26	2,91
3	1,04	5,30	3,21	3,60	3,24	4,16	2,90	3,58	2,67
4	1,39	4,98	3,73	3,42	2,83	3,76	3,06	3,36	2,38
5	1,74	4,32	3,91	3,48	2,83	3,87	3,49	3,07	2,50
6	2,09	4,80	3,90	3,52	3,42	3,42	3,50	2,97	2,63
7	2,43	5,97	4,18	3,45	3,61	3,63	3,37	3,04	3,01
8	2,78	5,83	4,37	4,10	3,62	3,69	3,22	3,11	2,71
9	3,13	5,57	4,74	4,15	3,73	3,83	3,32	2,96	2,91
10	3,48	5,32	4,52	4,23	3,77	3,59	3,04	3,12	2,92
11	3,83	5,75	4,44	4,78	3,70	4,30	3,36	3,15	2,59
12	4,17	6,68	4,54	4,45	3,85	3,83	3,63	3,54	2,97
13	4,52	6,03	5,00	4,64	3,58	3,62	3,23	3,93	3,18
14	4,87	6,14	5,18	4,62	3,67	3,72	3,64	3,50	3,15
15	5,22	6,47	5,69	4,84	4,12	4,09	3,55	3,89	3,19
16	5,57	6,66	5,72	4,29	4,05	4,20	3,34	3,56	3,08
17	5,91	5,86	6,07	4,66	3,98	4,05	3,75	3,54	2,97
18	6,26	7,01	6,31	4,45	4,46	3,70	3,61	3,21	2,99
19	6,61	7,12	7,16	4,42	4,85	4,11	3,51	3,53	3,12
20	6,96	6,58	7,79	4,73	5,42	3,76	4,29	3,16	2,96
21	7,30	7,14	8,37	4,24	6,30	3,55	4,14	3,21	2,95
22	7,65	7,11	9,79	4,02	6,39	3,00	4,01	2,79	3,02

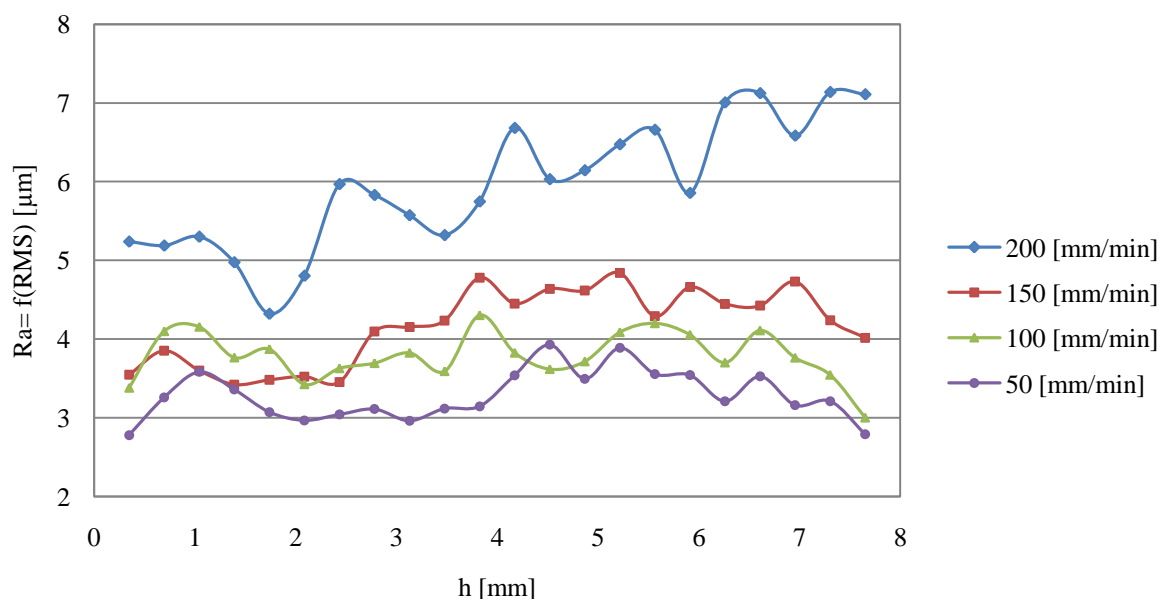
Střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm] je dosud nejčastěji používaný normovaný parametr popisující geometrii povrchu vytvořeného obráběním. Experimentální analýza dat byla názorně (matematicky a graficky) předvedena na vzorku z materiálu ČSN 17 251, kde byl povrch dělicí stěny vytvořen technologií AWJ za vstupních podmínek (viz tab. 6.1). Graf (viz obr. 6.5) nám představuje závislost drsnosti $Ra=f(RMS)$ na hloubce h a rychlosti posuvu řezné hlavy v pro ocel ČSN 17 215. Při zvyšující se postupové rychlosti a s rostoucí hloubkou h dělicího řezu se nám zhoršuje jakost obrobené plochy a roste drsnost povrchu.

Drsnost povrchu roste vždy tam, kde klesá deformační napětí a deformační síla, tedy pracovní schopnost nástroje [23]. Na počátku dělicího řezu je z hlediska napětíové deformačního stavu k dispozici poměrně vysoké deformační napětí, tudíž dochází k tomu, že

na začátku řezu je poměrně hladký dělicí řez (viz obr. 6.4). Poměrně vysokých hodnot se dosahuje v tzv. iniciační zóně na počátku dělicího řezu (do 1-2 mm hloubky dělicího řezu), kde tuhost nástroje je sice vysoká, ale zařezání do materiálu je energeticky nejnáročnější. Následující část řezu může být charakterizována novým přerozdělením a stabilizováním hydraulické energie v dělicím řezu. Dojde k vyrovnání hodnot napěťových složek v tangenciálním směru na tvorbu povrchu a v normálovém směru na prohlubování dělicího řezu. S rostoucí hloubkou řezu dochází k růstu drsnosti Ra a poklesu deformačního napětí (viz obr. 6.2 a obr. 6.4).



Obrázek 6.4 - Závislost skutečně naměřené hodnoty drsnosti Ra pomocí optického profilometru MikroProf FRT na hloubce h a rychlosti posuvu v pro ocel ČSN 17 215

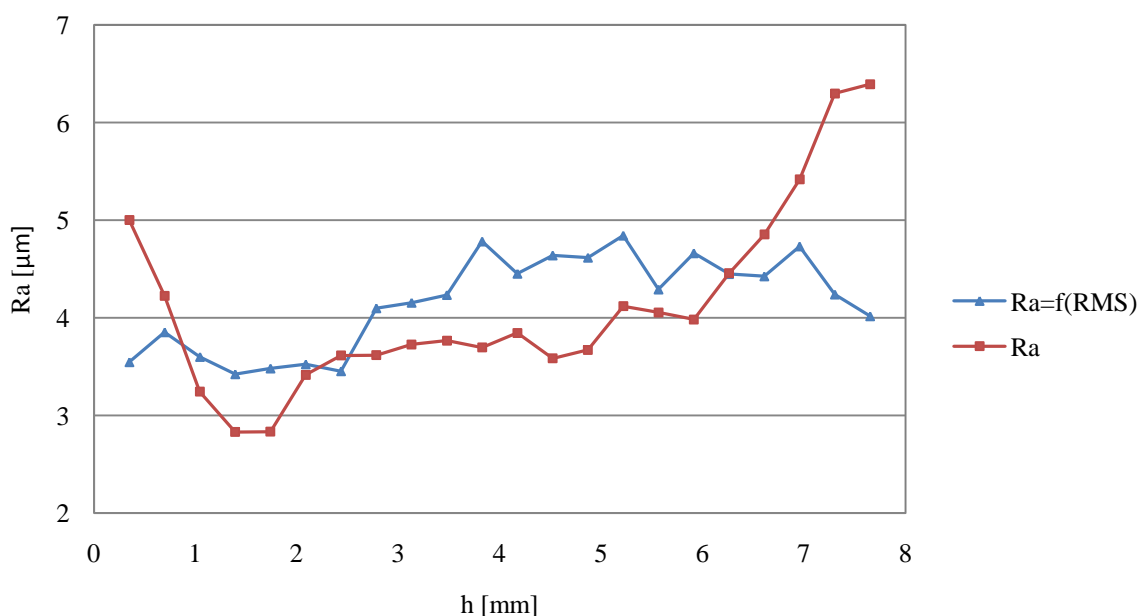


Obrázek 6.5 - Závislost drsnosti $Ra=f(RMS)$ na hloubce h a rychlosti posuvu v měřená stínovou metodou pro ocel ČSN 17 215

Při bližším prostudování grafu (obr. 6.5) však vidíme, že výše uvedený popis dělicího řezu vytvořeného pomocí technologie AWJ se v počáteční a konečné fázi grafického průběhu přepočtených geometrických parametrů Ra z naměřeného RMS liší. Na začátku řezu (do 1,5 mm hloubky dělicího řezu) v tzv. iniciační zóně, kde dochází k energeticky náročnému zařezávání nástroje do materiálu a tudíž by zde měli být vysoké hodnoty, vypočtená drsnost Ra z naměřených hodnot RMS je nízká (viz obr. 6.6). Na konci řezu (6,5 – 8 mm hloubky řezu) dochází k opačnému jevu. S rostoucí hloubkou h dělicího řezu klesá kinetická energie paprsku a tím rostou nerovnosti povrchu, avšak vypočtená drsnost Ra z naměřených hodnot RMS zde klesá. Tento jev je způsoben tím, že stínová metoda použitá k analýze vzorků, z níž jsme získali informace o povrchu dělicí stěny v podobě efektivní hodnoty signálu světla, nám naměřené data na počátku a konci řezu zkreslila.

Při namáhání materiálu na interaktivní ploše řezné fronty dochází k hydroabrazivnímu odštěpování stavebních složek materiálu včetně jejich případné destrukce na kontaktu. Náraz jednotlivých částic má pružně-plastický charakter. Pokud v nárazu převládá plastická složka, může dojít k zarytí a zakotvení abrazivního zrna do materiálu jak v rovině řezné fronty, tak i v rovině řezných stěn. Jde o mechanismus úběru, kdy abrazivní částice tlačí fragment materiálu, který je plasticky přetvořen, na konec vrypu a na konci vrypu (koryta)

tento fragment deponuje. Odejmutý a zpevněný odštěpek musí být pak odstraněn následně dopadající částicí. Takto vytvořený povrch dělicí stěny materiálu je matný. Naproti tomu u mechanismu úběru, kdy částice rotuje zpětně proti směru postupové rychlosti, dochází k přímému odhození fragmentu, který není zpevňován a deponován na konci vrypu. Brázda po něm zůstává čistá až opticky vybroušená, což z pohledu optiky vyvolává opakní efekty. Takto vytvořený povrch dělicí stěny je lesklý a při měření stínovou metodou dochází ke zkreslení skutečné drsnosti R_a povrchu dělicí stěny. Dalším důvodem odlišných experimentálně naměřených dat stínovou metodou je úhel 15° , pod kterým je optickou soustavou promítán světelný svazek, který po odrazu od měřeného povrchu prochází opět zobrazovací soustavou a dopadá na detektor, CCD kameru. Po dosažení určité kritické hloubky je proud AWJ zpomalován, v emulzním médiu přibývá objemový i váhový podíl drtě s počáteční nulovou kinetickou energií ovlivňující počátek tvorby hlubších deformací stěn řezu v podobě drážek a hlubších rýh. Při měření těchto koncových linií stínovou metodou, kdy na hodnocený povrch topografie dopadá světelný paprsek pod úhlem 15° dochází k tomu, že snímáný povrch se jeví jako méně drsný. K tomuto jevu dochází tak, že světelný paprsek osvítlí pouze vrcholky nerovností povrchu a tudíž nedojde k osvětlení skutečné drsnosti povrchu dělicí stěny [22], [23].



Obrázek 6.6 - Porovnání vypočtené $R_a=f(RMS)$ s naměřenou R_a z optického profilometru MikroProf FRT v závislosti na hloubce h a rychlosti posuvu $v=150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro materiál ČSN 17 251

6.5 Vzájemné vztahy mezi geometrickými parametry

Z hlediska distribuce hodnot RMS a hodnot výškových fluktuací byla geometrická a optická povrchová vrstva částečně charakterizována implicitním vztahem (6).

Ukázka dekompozice geometrie topografie povrchu vytvořeného technologií AWJ na dílčí geometrické parametry podle naměřené hodnoty RMS pro hloubkové úrovně h_a, h_b, h_c (sl. 9) je uvedena v tab. 6.5. Tabulka prezentuje statisticky podložený rozptyl naměřených hodnot pro kovy. Názorná ukázka dekompozice profilu povrchu podle získané hodnoty RMS je v příloze 1 až 3 mé diplomové práce zpracována pro kovové materiály ČSN 17 251, ČSN 422 712, AlMg, které byly vytvořeny za vstupních podmínek (viz tab. 6.1)

Na základě parametru zjištěného RMS pomocí stínové metody je možno predikovat další geometrické parametry topografie povrchu. Geometrické vztahy mezi uvedenými parametry topografie povrchu se řídí řadou zákonitostí souvisejících s mechanismem tvorby řezu, predikční výpočet jednotlivých uváděných parametrů se řídí vztahy (7) až (12) [26].

Tabulka 6.5 - Predikce geometrických parametrů z parametru RMS

Top. zóna	S_m [mm]	f [mm ⁻¹]	λ [mm]	Ra [μm]	RMS [a.u.]	ϕRMS [a.u.]	Y_{ret} [mm]	h_{a-c} [mm]	δ [°]
h_a	0,1 - 0,2	5 - 2,5	0,2 - 0,4	1 - 2	40 - 80	60	0 - 0,264	0 - 3	0 - 5
h_b	0,2 - 0,5	2,5 - 1	0,4 - 1	2 - 4	80 - 160	120	0,264 - 0,880	3 - 5	5 - 10
h_c	0,5 - 1	1 - 0,5	1 - 2	2 - 10	160 - 400	280	nad 0,880	nad 5	nad 10

$\Sigma RMS = 460$

Vztahy pro výpočet parametrů ve sloupcích 2, 3, 5, 8, 9 a 10 :

$$S_m = \frac{\lambda}{2} ; \quad (7)$$

$$f = \frac{1}{\lambda} ; \quad (8)$$

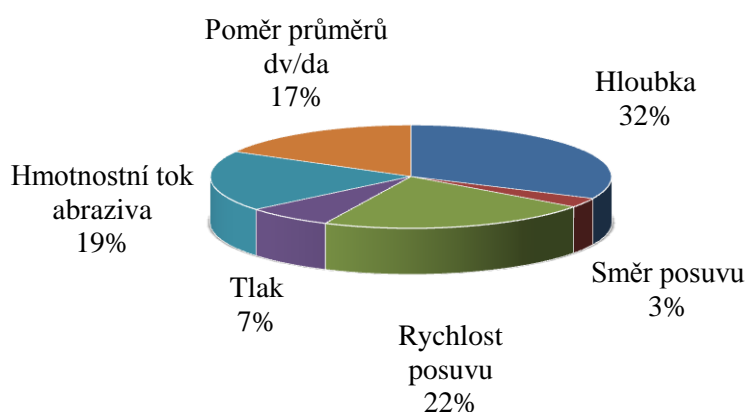
$$Ra = \frac{1}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx = \frac{RMS}{k_s}; \quad (9)$$

$$Y_{ret} = 0,22 \cdot Ra \cdot h_{rel}, h_{rel} = \frac{h_i}{h}, i = 1 - 22; \quad (10)$$

$$\delta = \arctg\left(\frac{Y_{ret}}{h}\right); \quad (11)$$

$$h_{(a,b,c)} = \frac{0,22 \cdot Ra \cdot h_i}{Y_{ret}}. \quad (12)$$

Podle volby vstupních technologických parametrů se intenzivně mění velikost hodnot v tab. 6.5, jak je patrné z ukázky predikce geometrických parametrů z parametru *RMS* pro materiál ČSN 17251, ČSN 422 712 a AlMg v příloze 1 až 3. Mezi technologické parametry, které nejpodstatněji ovlivňují geometrii finálního povrchu, okamžitý stav dělicího řezu a materiálu řadíme: rychlost posuvu řezné hlavy, tlak kapaliny, hmotnostní tok abraziva, poměr průměrů dv/da a hloubku, které jsou procentuálně znázorněny na obr. 6.7. Takto byly zjištěny statistickou metodou (faktorovou analýzou) [10], [26].



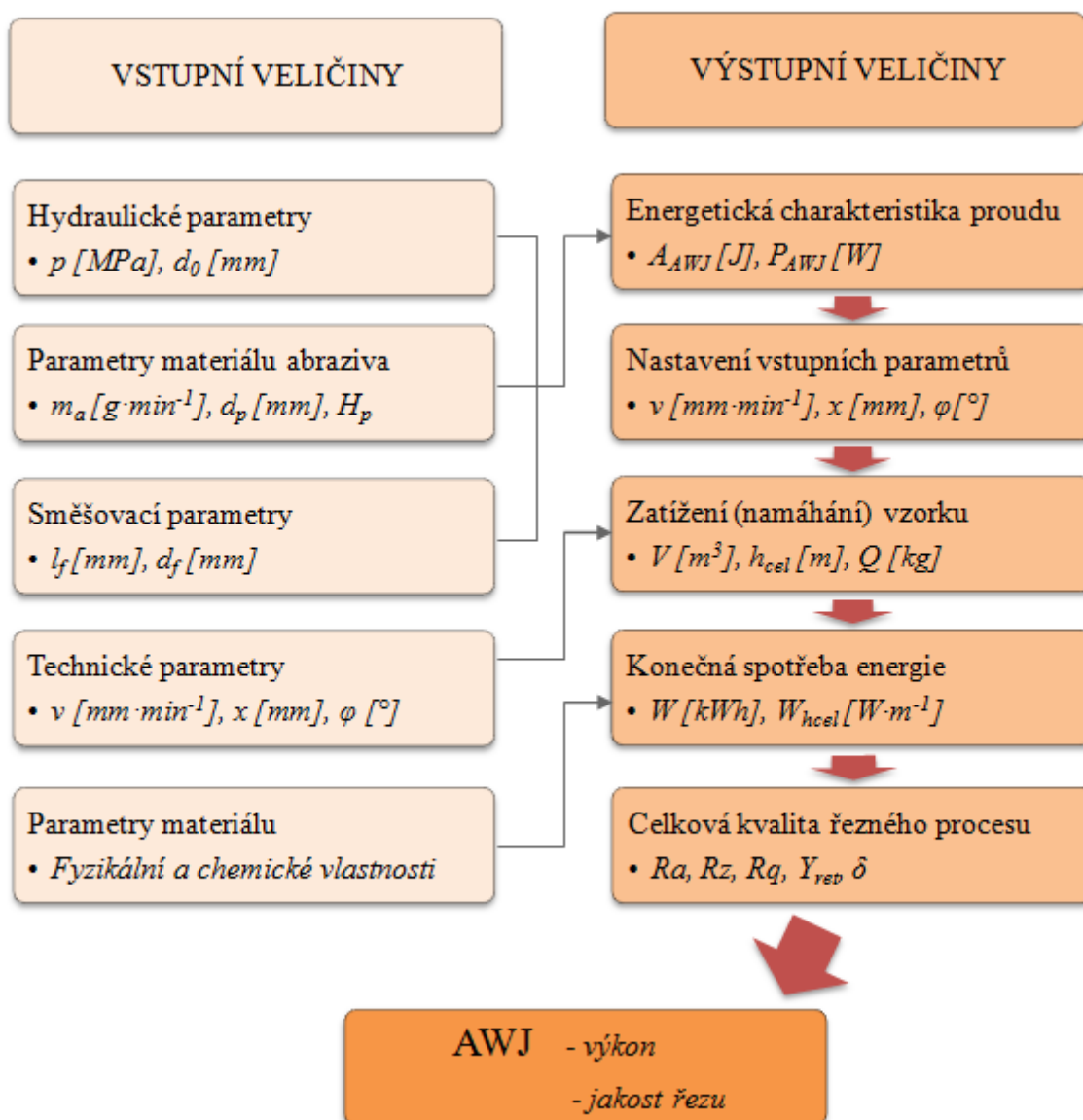
Obrázek 6.7 - Procentuální podíl vlivu faktorů na parametr profilu drsnosti *Ra* [11]

6.6 Návrh databanky

Koncepční struktura databanky je charakterizovaná na obr. 6.8. Hlavní vstupní a výstupní veličiny jsou upraveny podle [10] a to tak, že hydraulické parametry (tlak p a průměr vodního paprsku d_0), parametry materiálu abraziva (hmotnostní průtok abraziva m_a , průměr abraziva d_p a tvrdost abraziva H_p) a směšovací parametry (délka usměrňovací trubice l_f a průměr usměrňovací trubice d_f) tvoří na výstupu energetickou charakteristiku proudu (spotřeba práce řezu A_{AWJ} a výkon AWJ v řezu P_{AWJ}). Technické parametry (rychlost posuvu řezné hlavy v , zdvih x a úhel působení φ) mají přímý vliv na nastavení vstupních parametrů (rychlost posuvu řezné hlavy v , zdvih x a úhel působení φ). Parametry materiálu, tedy fyzikální a chemické vlastnosti vzorků podmiňují energetické zatížení (namáhání) vzorků (objem zpracovaného materiálu V , celková odřezaná délka materiálu h_{cel} a zpracované váhové množství materiálu Q) ovlivňované dále požadavky na náročnost a kvalitu jejich opracování. Materiálové parametry jako jsou pevnost v tlaku, tahu, smyku, modul pružnosti, měrná hmotnost, Poissonovo číslo, rychlost šíření ultrazvukových vln a další, týkající se např. chemického složení, patří vedle hlavních technologických parametrů mezi základní vstupy. Materiálové konstanty určují mechanické chování materiálu v řezu a charakter vyvolaného silového, napětového a deformačního pole.

Všechny zmiňované vstupní veličiny, které přímo ovlivňují výstupní veličiny (viz obr. 6.8), jako jsou: energetická charakteristika proudu, nastavení vstupních parametrů a zatížení (namáhání) vzorku mají dále vliv na konečnou spotřebu energie (spotřeba elektrické energie W a W_{hcel}) a celkovou kvalitu řezného procesu (geometrické parametry topografie povrchu Ra , Rq , Rz , zpoždění řezné stopy Y_{red} a deviační úhel δ).

Výše uvedené parametry, jejichž vazby jsou názorně prezentovány v obr. 6.8 v grafickém návrhu databanky, nám jako celek ovlivňují výsledný výkon řezání a jakost řezu při použití technologie AWJ. Jakost povrchu, zejména technická drsnost řezné stěny, nás informuje o topografickém stavu, ale i o vstupních veličinách technologického procesu, jakými byla vytvořena, jakož i o fyzikálně-mechanickém charakteru samotného materiálu. Dále pak energetická charakteristika proudu (výkonové parametry), konečná spotřeba energie a s ní spojené náklady, nás informují o výkonu řezání a nákladech na provoz. Tato část databanky je velmi významnou, jelikož dnešní trend výroby klade důraz na ekonomičnost a ekologičnost výrobního procesu.



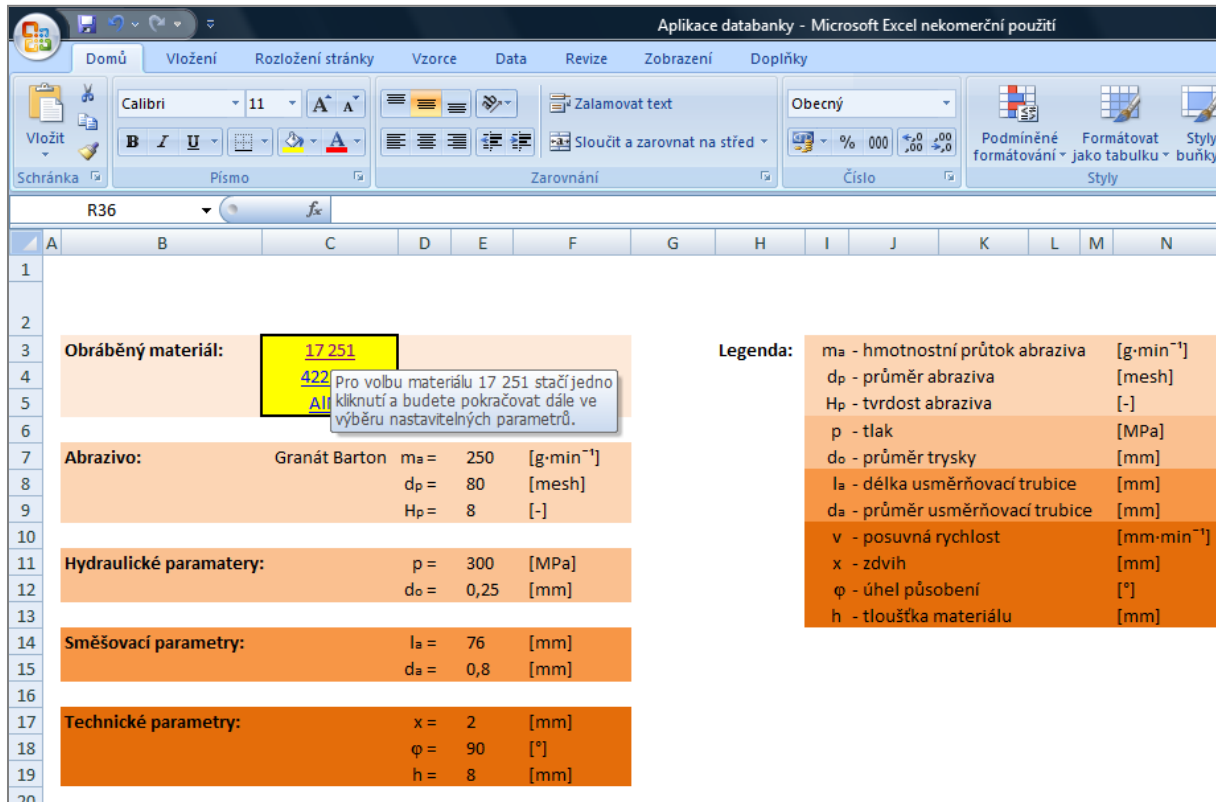
Obrázek 6.8 - Návrh databanky

Význam symbolů:

A_{AWJ}	-	spotřeba práce na řez [J],
P_{AWJ}	-	výkon AWJ v řezu [W],
V	-	objem zpracovaného materiálu [m ³],
h_{cel}	-	celková odřezaná délka materiálu [m],
Q	-	zpracované váhové množství materiálu [kg],
W	-	spotřeba elektrické energie [kW·h],
W_{hcel}	-	spotřeba elektrické energie [W·m ⁻¹],

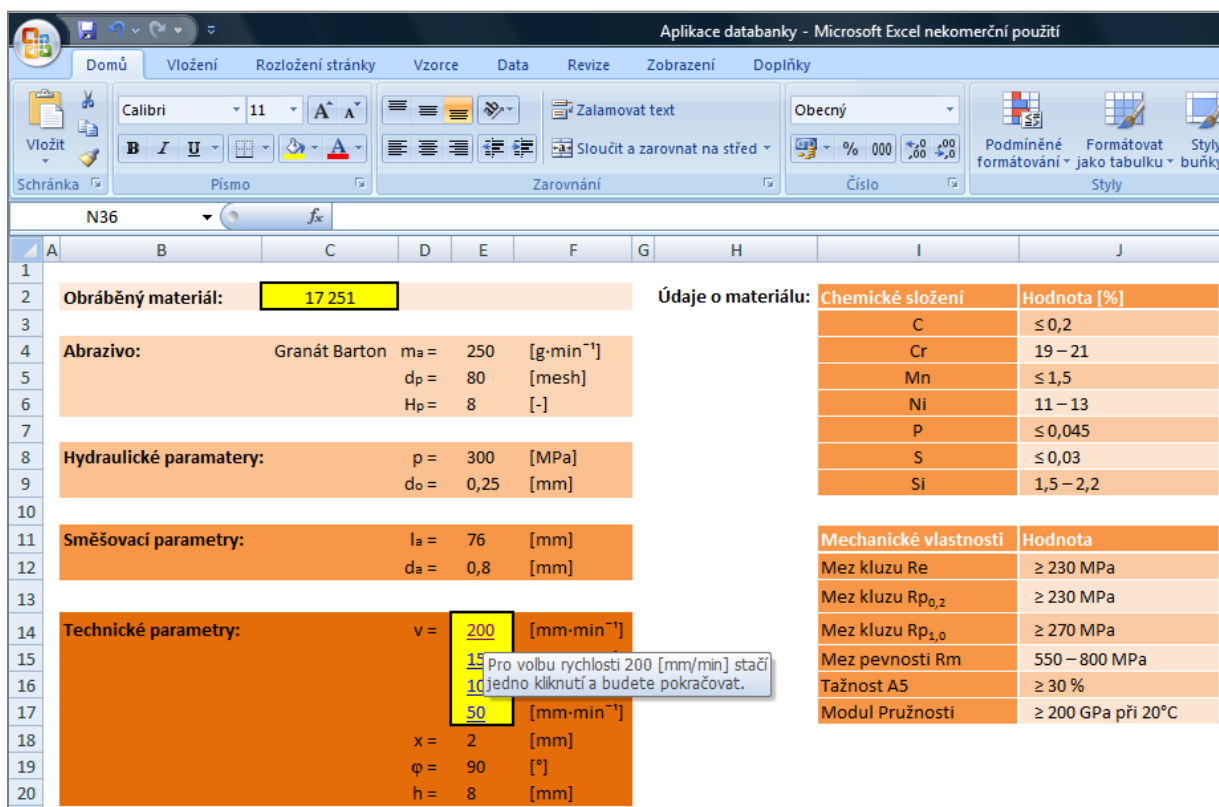
Pro praktickou ukázkou navrhované databanky (podle obr. 6.8) jsem vytvořila její aplikaci ve formátu Excel. V této aplikaci jsou zpracovány naměřené a analyzované data materiálů ČSN 17 251, ČSN 422 712, AlMg, které byly vytvořeny za vstupních podmínek (viz tab. 6.1). Návrh databanky je založen na funkci hypertextových odkazů, které nás po výběru volitelného parametru odkáží na nový list s požadovanými údaji. Tyto odkazy jsou opatřeny krátkým komentářem, ve kterém je popis k dalšímu kroku. Při použití souboru „Aplikace databanky.xlsx“ můžeme volit mezi výše uvedenými třemi materiály, postupovou řeznou rychlostí 200, 150, 100, 50 mm·min⁻¹ pro materiály ČSN 17 251, ČSN 422 712 a 400, 300, 200, 100 mm·min⁻¹ pro materiál AlMg.

V první fázi, na úvodní straně souboru „Aplikace databanky.xlsx“ na obr. 6.9 je možnost volby obráběného materiálu. Pro volbu požadovaného materiálu stačí jedno kliknutí na vybraný hypertextový odkaz a budete pokračovat dále ve výběru nastavitelných parametrů. Ostatní vstupní parametry, které jsou zde uvedeny, jsou pevně stanovené a vztahují se k nastavení experimentu vstupních referenčních technologických parametrů AWJ. Úvodní list obsahuje pro usnadnění legendu používaných symbolů.



Obrázek 6.9 - Aplikace databanky – volba obráběného materiálu

V další fázi nás hypertextový odkaz posunul na list, kde je umístěn vybraný materiál. Zde jsou, jako na obr. 6.10, popsány základní fyzikální a chemické vlastnosti (parametry materiálu) pro analyzované kovy. V této části souboru „Aplikace databanky.xlsx“ volíme postupovou řeznou rychlost. Pro materiál ČSN 17 251 na obr. 6.10 jsem ukázkově vybrala nejvyšší řeznou rychlost $v=200\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obrázek 6.10 - Aplikace databanky – volba postupové řezné rychlosti u obráběného materiálu ČSN 17 251

Po volbě řezné rychlosti nás hypertextový odkaz přenesl na list obsahující vstupní nastavení volitelných i pevně stanovených parametrů AWJ a výstupní veličiny celkové kvality řezného procesu (viz obr. 6.11).

Spotřeba elektrické energie, která je nedílnou součástí návrhu databanky (obr. 6.8) nebyla zahrnuta do souboru „Aplikace databanky.xlsx“ z důvodu nezměření hodnot při přípravě vzorků. V praxi se využívá jednoduchého výpočtu pro zjištění energetických nákladů při obrábění abrazivním vodním paprskem. Hodnoty (kW a kW·h) se natočí na

elektrohodinách v dílně a jednotkově se vztáhnou na nařezané plochy dělicích stěn (nařezané délky a hloubky) $S_{del} [m^2]$ a následně se rozpočítá spotřeba práce na řez na nařezanou plochu dělicí stěny $J \cdot m^{-2}$, spotřeba elektrické energie na nařezanou plochu dělicí stěny $kW \cdot m^{-2}$ a $kWh \cdot m^{-2}$, cena nařezané plochy dělicích stěn $Kč \cdot m^{-2}$.

$$S_{del} = L_{del} \cdot h_{del} \quad (13)$$

Aplikace databanky - Microsoft Excel nekomerční použití

Rež	Top. zóna	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Yret [mm]	ha-c [mm]	δ [°]
1	ha	5,24	6,29	31,43	0,05	0,35	0,36
2		5,19	6,23	31,13	0,10	0,70	0,71
3		5,30	6,36	31,81	0,15	1,04	1,09
4		4,98	5,97	29,85	0,19	1,39	1,36
5		4,32	5,19	25,93	0,21	1,74	1,48
6		4,80	5,77	28,83	0,28	2,09	1,97
7	hb	5,97	7,16	35,81	0,40	2,43	2,86
8		5,83	7,00	34,98	0,45	2,78	3,19
9		5,57	6,69	33,44	0,48	3,13	3,43
10		5,32	6,39	31,93	0,51	3,48	3,64
11		5,75	6,90	34,48	0,60	3,83	4,32
12		6,68	8,02	40,09	0,77	4,17	5,48
13	hc	6,03	7,24	36,19	0,75	4,52	5,36
14		6,14	7,37	36,86	0,82	4,87	5,87
15		6,47	7,77	38,84	0,93	5,22	6,62
16		6,66	7,99	39,95	1,02	5,57	7,26
17		5,86	7,03	35,14	0,95	5,91	6,79
18		7,01	8,41	42,04	1,21	6,26	8,57
19		7,12	8,55	42,74	1,29	6,61	9,19
20		6,58	7,90	39,50	1,26	6,96	8,95
21		7,14	8,57	42,83	1,43	7,30	10,16
22		7,11	8,53	42,66	1,50	7,65	10,59

Obráběný materiál: 17 251

Abrazivo: Granát Barton $m_a = 250$ [g·min⁻¹]
 $d_p = 80$ [mesh]
 $H_p = 8$ [-]

Hydraulické parametry: $p = 300$ [MPa]
 $d_o = 0,25$ [mm]

Směšovací parametry: $l_a = 76$ [mm]
 $d_a = 0,8$ [mm]

Technické parametry: $v = 200$ [mm·min⁻¹]
 $x = 2$ [mm]
 $\phi = 90$ [°]
 $h = 8$ [mm]

Celková kvalita řezného procesu - viz. tab.

Obrázek 6.11 - Aplikace databanky – výsledná kvalita řezného procesu pro materiál

ČSN 17 251 obráběný postupovou řeznou rychlostí $v=200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

7 ZÁVĚR

Úvodní kapitoly diplomové práce jsou věnovány popisu současného stavu technologie AWJ. Zde je podrobněji popsán vznik řezného nástroje (vodní abrazivní paprsek), jeho působení na obráběný materiál a s tím spojená volba trysky (životnost trysek podle firmy FLOW).

V další části je proveden rozbor metod hodnocení topografie povrchu s uvedením jednotlivých výhod a nevýhod. Z prezentovaných metod je podrobněji popsána stínová metoda, která byla použita pro měření povrchů vytvořených abrazivním vodním paprskem v experimentální části, dále optická (optický profilometr MicroProf FRT) a mechanická (kontaktní profilometr HOMMEL TESTER T8000) metoda.

Pro konfrontaci výsledků získaných stínovou metodou bylo využito přímých měření kontaktním profilometrem HOMMEL TESTER T8000 pro materiál ČSN 17 251 a optickým profilometrem MicroProf FRT pro materiály ČSN 17 215, ČSN 422 712, AlMg. Touto konfrontací byly získány přepočtové koeficienty, pomocí kterých, na základě získané hodnoty *RMS* a přepočtových vztahů, byly predikovány geometrické parametry povrchu dělicích stěn, a to jak výškové tak i podélné. Tyto parametry nám určují vhodnost využití či nutnost dalšího opracování obrobeného povrchu, a tím nám výrazně ovlivňují celkové náklady na výrobu.

V předmětné práci je grafický návrh databanky vstupních a výstupních parametrů. Praktická ukázka aplikace databanky je provedena ve formátu Excel. Tato databanka by měla sloužit k nadimenzování technologie právě tak, aby se zamezilo nutnosti dalšího opracování materiálu vytvořeného technologií AWJ. V současnosti je snaha o automatizaci procesu obrábění s použitím vodního abrazivního paprsku jako nástroje a tím zvýšit konkurenční schopnost této nekonvenční metody. V technické praxi to znamená, že je nutno zajistit vyhodnocení kvality právě vzniklého povrchu. K tomuto účelu slouží navržená databanka, která by měla zvýšit jak jakost obráběných materiálů, tak i účinnost samotné technologie.

SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

- [1] BILÍK, O. *Obrábění I – 2. díl*. Ostrava, VŠB-TUO Ostrava, 2001, 136 s. ISBN 80-248-0033-0.
- [2] BLAGODARNY, V. – KMEC, J. – HLOCH, S.: Supersonic hydroabrasive erosion, Zborník tretej medzinárodnej vedecko-technickej konferencie: Balttechmaš – 2002, str. 24-28
- [3] BOUŠKA, V., KAŠPAR, P. *Speciální optické metody*. Praha: Academia, 1983, 198 s.
- [4] BREZINA, I. Drsnosti povrchu – význam kvantifikácie drsnosti - metrologické aspekty - vývojové tendencie. *Jemná mechanika a optika*, 1991, č. 7. ISSN 0009-0700.
- [5] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B.: *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL 1989
- [6] ČSN EN ISO 4288
- [7] HLAVÁČ, L.: *Model pro řízení parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů v pevné fázi: doktorská disertační práce*. Ostrava, 2000
- [8] HLAVÁČEK, P. *Měření distribuce výškových a podélných fluktuací povrchu kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem a jejich analýza: bakalářská práce*. FS VŠB-TUO, Ostrava, 2007, 55 s.
- [9] HLOCH, S. *Vplyv procesných parametrov vysokorýchlostného hydroabrazívneho prúdu na kvalitu obrobenej plochy: dizertačná práca*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2004, 138 s., 6 príl.
- [10] HLOCH, S., GOMBÁR, M.: Drsnosť povrchu nehrdzavejúcej ocele pri delení vysokorýchlostným hydroabrazívnym prúdom. In: MM. Průmyslové spektrum. no. 7,8 (2006), p. 48-50. ISSN 1212-2572. Praha, Česká republika.
- [11] HLOCH, S., VALÍČEK, J.: *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvořených hydroabrazivním delením*, Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií, 2008, 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7
- [12] HLOCH, S., VALÍČEK, J., GOMBÁR, M., FABIAN, S. Analýza hlučnosti pri delení nehrdzavejúcej ocele pri delení vysokorýchlostným hydroabrazívnym prúdom. *Elektrotechnika v praxi*, 2007, roč. 17, č. 3-4, s. 182-185. ISSN 0862-9730.
- [13] HLOCH, S., VALÍČEK, J., RADVANSKÁ, A. Noise evaluation at abrasive waterjet cutting of materials by means of factor analysis. *Nonconventional Technologies Review*, 2007B, no. 4. ISSN 1454-3087.

- [14] KLICH, J. *Analýza a komparace drsnosti povrchu vytvořených abrazivním vodním paprskem z hlediska různých postupových rychlostí: bakalářská práce*. Ostrava: FS VŠB-TU, 2007, 37 s
- [15] KLICHOVÁ, D. *Měření drsnosti povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem, jejich klasifikace podle dosahované drsnosti a návržení databáze vzhledem k vytypovaným technologickým parametrům: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Ostrava, 2007, 39 s.
- [16] KRAJNÝ, Z.: *Vodný lúč v praxi*. Bratislava: Miroslav Mračko. 1998, 384 s. ISBN 80-8057-091-4
- [17] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [18] MARTINEC, P., FOLDYNA, J., SITEK, L., ŠČUČKA, J., VAŠEK, J. *Abrasives for AWJ cutting*. Ostrava: Academy of Sciences, 2002, 80 s.
- [19] SHAVLOVSKY, D. S. Hydrodynamics of High Pressure Fine Continuous Jets. In: Brock, T. E., Richardson, A. (eds.) 1972 Proceedings of the 1st International Symposium of Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, pp.A6-A81.
- [20] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.
- [21] VALÍČEK, J. Některé závěry z analýz dezintegrace materiálu v pevné fázi vodním a abrazivním vodním paprskem. In *METAL 2005, 14. mez. Metal. Konference 23.- 26. 5. 2005*, Hradec nad Moravicí, Česká republika [CD-ROM], Ostrava : Tanger, s.r.o., 2005A, s. 1-6. ISBN 80-86840-18-2.
- [22] VALÍČEK, J.: *Snímání kvality povrchu materiálu pro řízení technologie kapalinového paprsku: doktorská práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Institut fyziky, 2003, 92 s.
- [23] VALÍČEK, J. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu: habilitační práce*, Institut fyziky HGF VŠB-TUO, Ostrava, 2003.
- [24] VALÍČEK, J., DRŽÍK, M., HLOCH, S., OHLÍDAL, M., LUPTÁK, M., GOMBÁR, M., RADVANSKÁ, A., HLAVÁČEK, P., PALENÍKOVÁ, K. Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive water jet. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, Elsevier, 2007A, p. 1786-1790. ISSN 0890-6955.
- [25] VALÍČEK, J., DRŽÍK, M., OHLÍDAL, M., MÁDR, V., HLAVÁČ, L., M., Optical method for surface analyses and their utilization for abrasive liquid jet automation. In:

- Proc. of the 2001 WJTA American Waterjet Conference, M. Hashish (ed.), WJTA, Minneapolis, Minnesota, pp. 1–11, 2001.
- [26] VALÍČEK, J.; HLOCH, S. *Měření a snímání kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Ostrava: VŠB-TUO 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5
- [27] VASILKO, K., KMEC, J.: *Delenie materiálu: Teória a technológia*. Prešov: DATAPRES, 2003. 232 s. ISBN 80-7099-903-9
- [28] VAŠEK, J., MARTINEC, P., FOLDYNA, J., SITEK, L., ŠČUČKA, J.: *Abrasives for AWJ cutting*. Academy of Sciences, Ostrava, 2002
- [29] VARDŽÍK, M. *Posúdenie životnosti zaostrovacej trubice pri delení materiálu vysokorychlostným hydroabrazívnym prúdom: diplomová práce*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií, 2007. 63 s.
- [30] NOSAL', D. *Návrh, hodnotenie a analýza procesných faktorov vysokorychlostného hydroabrazívneho prúdu na povrchovú drsnosť pri delení hliníka: diplomová práce*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií, 2006. 85 s.
- [31] [12. dubna 2008, 18:00]. Dostupné na WWW: <http://www.woma-applications.com/english.htm?/cont/en/reports/r_cutting_technique_e.htm>
- [32] [12. dubna 2008, 18:30]. Dostupné na WWW: <http://www.jetedge.com/content.cfm?fuseaction=dsp_products_detail&product_ID=83>
- [33] [12. dubna 2008, 20:00]. Dostupné na WWW: <http://www.jetedge.com/content.cfm?fuseaction=dsp_products_detail&product_ID=77>
- [34] [12. dubna 2008, 21:00]. Dostupné na WWW: <<http://www.maximator-jet.de/prinzip3.php?lang=en>>
- [35] [15. dubna 2008, 15:00]. Dostupné na WWW: <<http://www.flowcorp.com/waterjet-resources.cfm?id=344>>

PUBLIKACE AUTORA SOUVISEJÍCÍ S DANOU PROBLEMATIKOU

- [1] VALÍČEK, J., HLOCH, S., GOMBÁR, M., ČEP, R., HLAVÁČEK, P., KLICHOVÁ, D., KLICH, J., PLAČEK, M.: *Aplikace bezkontaktní optické metodiky měření a interpretace získaných výsledků*. In Metal 2007, Hradec nad Moravicí, květen 2007, CD sborník přednášek – přednáška číslo 181, TANGER s.r.o., Ostrava, 2007, ISBN 978-80-86840-33-8
- [2] KLICH, J., KLICHOVÁ, D., VALÍČEK, J., ČEP, R.: *Analýza povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem, návržení databáze vzhledem k vytypovaným technologickým parametrům, komparace z hlediska různých postupových rychlostí*. International scientific student's conference, Nitra, duben 2007, CD sborník přednášek strana 99 - 105, Ostrava, 2007, ISBN 978-80-8069-878-2
- [3] KLICHOVÁ, D.: *Měření drsnosti povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem, jejich klasifikace podle dosahované drsnosti a návržení databáze vzhledem k vytypovaným technologickým parametrům: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Ostrava, 2007, 39 s.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Materiál ČSN 17 251

Příloha 2 – Materiál ČSN 422 712

Příloha 3 – Materiál AlMg